



TITLE:

電解バフ複合加工の特性解析と性能向上に関する研究(
Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

釜田, 浩

CITATION:

釜田, 浩. 電解バフ複合加工の特性解析と性能向上に関する研究. 京都大学, 1994, 博士(工学)

ISSUE DATE:

1994-03-23

URL:

<https://doi.org/10.11501/3075948>

RIGHT:

①

電解バフ複合加工の特性解析と 性能向上に関する研究

1993

釜 田 浩

目 次

第1章 結 言	1
第2章 電解加工、バフ研磨材加工の機構と加工性能	5
2-1 緒 論	5
2-2 電解加工	6
2-2-1 加工機構	6
2-2-2 加工性能	12
2-3 バフ研磨材加工	15
2-3-1 加工機構	15
2-3-2 加工性能	22
2-4 電解バフ複合加工	24
2-4-1 加工機構	24
2-4-2 加工性能	26
2-5 結 論	28
第3章 電解バフ複合加工機構の解析(そのⅠ)	29
-不働態化膜の生成機構の解析-	
3-1 緒 論	29
3-2 実験装置と方法	30
3-2-1 実験装置	30
3-2-2 実験方法	33
3-3 実験結果と考察	34
3-3-1 工作物の不働態化と溶出	34
3-3-2 不働態化膜の測定	38
3-3-3 電解ギャップの等価回路	43
3-3-4 不働態化膜の生成機構についての考察	47
3-4 結 論	53
第4章 電解バフ複合加工機構の解析(そのⅡ)	54
-電解と砥粒擦過による複合除去作用の解析-	
4-1 緒 論	54
4-2 砥粒の擦過軌跡と工作物の温度上昇の解析	55

4-2-1	砥粒の擦過軌跡	55
4-2-2	作用砥粒数	60
4-2-3	工作物の温度上昇	64
4-3	実験装置と方法	70
4-4	実験結果と考察	72
4-4-1	単粒ダイヤモンドを用いた加工	72
4-4-2	バフ研磨材の擦過作用	78
4-4-3	電解バフ複合加工における電解電流	83
4-4-4	電解バフ複合加工の加工能率	88
4-5	結 論	89
第5章	ステンレス鋼の鏡面加工	91
5-1	緒 論	91
5-2	ステンレス鋼の不働態化膜の特徴	92
5-3	実験装置と方法	94
5-4	実験結果と考察	97
5-4-1	電解バフ複合加工の加工性能	97
5-4-2	表面粗さに影響を及ぼす加工因子	100
5-4-3	加工能率に影響を及ぼす加工因子	105
5-4-4	遊離砥粒を用いた電解バフ複合加工による鏡面加工	107
5-5	形状精度に影響を及ぼす加工因子	110
5-5	電解バフ複合加工によるステンレス鋼の鏡面加工の実施例	117
5-5-1	a-Si太陽電池基板の製作	117
5-5-2	高性能真空チャンバの製作	122
5-6	結 論	124
第6章	炭素鋼の鏡面加工	126
6-1	緒 論	126
6-2	炭素鋼の不働態化膜の特徴	127
6-3	回転円盤型複合工具電極で円筒状の工作物を加工する際の砥粒の擦過軌跡	130
6-4	実験装置と方法	134
6-4-1	円筒状の工作物が回転しない場合	134
6-4-2	円筒状の工作物が回転する場合	136
6-5	実験結果と考察	136

6-5-1	オフセットを与えた場合のうねりの平滑化	136
6-5-2	擦過条痕の交差角がうねりに及ぼす影響	140
6-5-3	円筒状の工作物が回転する場合の真円度と表面粗さ	141
6-6	結 論	143
第7章	Tiの鏡面加工	144
7-1	緒 論	144
7-2	Tiの化学的活性がバフ研磨材加工に及ぼす影響	145
7-3	実験装置と方法	149
7-4	実験結果と考察	149
7-4-1	電解作用と界面活性剤が表面粗さに及ぼす影響	149
7-4-2	表面粗さに影響を及ぼす加工因子	153
7-4-3	Tiの加工能率	156
7-5	結 論	157
第8章	Alの鏡面加工	159
8-1	緒 論	159
8-2	Alの不働態化膜の特徴	160
8-3	実験装置と方法	162
8-4	実験結果と考察	162
8-5	結 論	171
第9章	Cuの鏡面加工	172
9-1	緒 論	172
9-2	Cuの不働態化膜の特徴	173
9-3	実験装置と方法	175
9-4	実験結果と考察	175
9-5	結 論	180
第10章	結 言	181
謝 辞		185
参考文献		186

第1章 緒 言

生産加工においてはより高品質な製品をより高い加工能率で作ること、すなわち加工性能が高いことが常に求められている。高品質とは高い加工精度すなわち寸法精度、形状精度、仕上げ面性状の優れたものをいい、加工能率とは単位時間当たり、単位労働力当たり、単位設備当りに生産される製品の量をいう。この両者がある程度兼ね備えた一般的な除去加工法として、切削加工、研削加工、砥粒加工のように工作物と工具の間に相對運動を与えて、工作物より硬い工具を工作物と干渉させ、切り屑として除去する加工法がある。また電気物理化学的なエネルギーを用いて不要部を除去する方法として、電解加工、放電加工、レーザー加工などがあり、かなり産業界で使用されている。

これらの方法は単独で使用されることが多いが、工作物が特殊な難削材であったり、特別な高品質が求められる場合には、高品質と高い加工能率を両立させることが困難なこともしばしば生じている。この矛盾する二つの要求を満たす必要から複合加工法が開発された。複合加工法は、「二つ以上の加工手段をそれぞれ単独に用いて加工する場合に比較して、複合（相乗）効果により総合の加工能率、加工精度（品質）が向上する」ものとされ¹⁾、大越が1966年に初めてその必要性を説いた²⁾。当時は超硬合金などの難削材を能率よく加工するために、電解加工と砥粒加工を複合させた複合加工の研究が多く行われ、電解研削、電解ラッピングなどの加工法が開発された³⁾。

一方、工業製品の性能は部品の精度と仕上げ面性状が高まることによって飛躍的に向上している。特に近年急速に普及したVTR、乾式複写機、磁気ディスク記憶装置などには鏡面加工された部品が多く用いられているが、これらの部品は製品の性能を飛躍的に向上させている。鏡面加工は従来、反射鏡など光学部品として用いられるものに対してのみ行われてきた。ところが最近では製品の性能、機能をより高めるために、従来鏡面にすることが困難といわれていた材料を鏡面加工したいという要望が高まってきた。この要望は今後さらに増大するものと思われる。ここで鏡面とは、表面の凹凸が可視光線の波長の約1/8以下（およそ0.05[μm]以下）になり、光の正反射が多くなる鏡のような表面をいう。鏡面加工とは鏡面でかつ形状精度に優れた加工をいい、粗さの低減だけを目的とした鏡面研磨とは区別されている。

除去加工法で工作物を鏡面加工するためには、振動などの外乱の無い状態で工作物を

微小に除去することが必要であり、加工機械には高い剛性と高い精度が必要である。現在、鏡面加工用に用いられている除去加工法としては、超精密旋盤を用いた単結晶ダイヤモンド工具による微小切削、精密ラップ盤によるラッピング、ポリッシングなどがある。しかしこれらの加工機械は通常の機械に比べて高価な上に、高度に熟練した技能者を必要とする。鏡面加工技術は今後、加工の品質、加工の能率の両面から改善する必要がある。そのためには既存の加工法とは加工原理の異なる新しい除去加工法が必要である。

このような状況の中で、1978年木本らはバフ研磨材の砥粒による擦過作用と電解作用を複合させた電解複合鏡面研磨法について研究を行った⁴⁾。この方法は従来の電解加工と砥粒加工を複合させた複合加工法とは以下の点が異なっている。

- ① 陽極（工作物）が不働態化する酸素酸塩型の電解液を用いる。
- ② 砥粒擦過による微小切削のためにバフ研磨材を用いる。この研磨材は研削加工用の砥石に比べて単位時間当たりに工作物を除去する能力が低い。
- ③ 電解作用は不働態化域で行うために電流密度が低い。
- ④ 鏡面加工が行える。

電解作用のみで工作物を除去加工する場合、酸素酸塩型の電解液を用いると工作物の表面が不働態化するために鏡面に仕上げるのは困難である。しかし木本らは電解作用とバフ研磨材の砥粒による擦過作用とを複合させることにより、ステンレス鋼を表面粗さ $R_{\max} 0.05 [\mu m]$ 以下の鏡面にできることを報告している⁴⁾。さらに木本らはこの加工法において砥粒の擦過作用が工作物の形状精度に及ぼす影響を調べ、この加工法で工作物の形状精度を向上させられることを指摘し、電解バフ複合加工法*と名付けた。

それ以来、電解バフ複合加工法は新しい鏡面加工技術として多数の研究が行われている⁵⁻⁷⁾。これらの研究において、電解バフ複合加工法の機構は砥粒の擦過によって生じる工作物表面の状態変化を仮定して、次のように定性的に説明されている。すなわち、陽極の工作物が不働態化する電解条件において、工作物の表面に生成された不働態化膜は砥粒の擦過によって擦過条痕が形成された部分のみ除去されると仮定すると、表面では1個の砥粒の擦過前後で以下に示す3つの現象が生じる。

脚注 * 電解作用とバフ研磨材の砥粒による擦過作用を複合させた加工法は、厳密には電解バフ研磨材複合加工法というべきであるが、長くなるので単に電解バフ複合加工法ということとした。

- ① 不働態化膜の生成（砥粒擦過前）：酸素酸塩型電解液の電解によって不働態化膜が生成される。
- ② 不働態化膜の除去（砥粒擦過時）：砥粒の擦過によって不働態化膜、陽極素地の一部が除去される。
- ③ 陽極の溶出（砥粒擦過後）：砥粒の擦過によって素地が露出した部分に電解電流が集中して陽極溶出が生じる。

加工中にはこれら3つの現象が①→②→③→①の順に繰り返される。

しかし加工中にこのような現象が生じるかどうかは確認されていず、現象の定量的な記述もなされていない。そのためにこの加工法を各種金属材料の鏡面加工技術として用いた場合、生産技術上十分な加工能率と加工精度が得られるかどうかは明かでない。加工機構を解明するためには、まず前述の3つの現象それぞれの過渡的な挙動を明らかにすることが必要で、その上でそれぞれの現象が繰り返し生じるかどうかを確認する必要がある。

本論文は、以上のような観点から電解バフ複合加工法の加工機構を定量的に解析し、これに基づいて鏡面加工を能率よく行うために必要な砥粒に与えるべき軌跡について考察する。さらに鏡面加工の必要性の高いステンレス鋼、炭素鋼、Ti、Al、Cuの鏡面加工を行う方法について具体的に研究する。

本論文の構成は次のようになっている。

第2章では、電解バフ複合加工法の基礎となっている電解加工とバフ研磨材加工について、単独で加工を行う場合の加工機構および加工能率と加工精度について概略的に考察する。さらにこれら二つの加工法を複合させた場合の加工機構および加工能率と加工精度について概略的に考察する。

第3章では、電解バフ複合加工法の加工機構を解明する第1ステップとして、前述の3つの現象の中、①不働態化膜の生成機構を定量的に解析する。そのために、酸素酸塩型の電解液を用いて純Tiの電解加工実験を行ない、ギャップ電圧を印加した当初の電解電流の過渡的な変化を測定して、不働態化膜の生成にともなうギャップ抵抗の変化を考察する。

第4章では、バフ研磨材で金属の表面を擦過した場合の砥粒の擦過軌跡と温度上昇に

について考察した上で、加工機構を解明する第2ステップとして②不働態化膜の除去と③陽極の溶出機構について解析する。加工中の現象を調べるために、微小な擦過領域を設けた工作物を単粒ダイヤモンドとバフ研磨材で加工する実験を行い、砥粒の擦過に伴う電解電流の変化を測定する。この結果と第3章の解析結果を基にして工作物の表面で生じる現象について考察する。

第5章では、第4章までに明らかにした加工機構に基づいてステンレス鋼の鏡面加工を行う方法について具体的に検討する。まずステンレス鋼の不働態化膜の特徴を検討し、それが電解バフ複合加工に及ぼす影響を品質と加工能率の面から考察する。さらに電解バフ複合加工によるステンレス鋼の鏡面加工の実施例について述べる。

第6章では、炭素鋼の鏡面加工を行う方法について具体的に検討する。まず炭素鋼の不働態化膜の特徴を検討し、それが電解バフ複合加工に及ぼす影響を品質と加工能率の面から考察する。また円筒状の工作物をうねりの少ない鏡面に仕上げるために必要なバフ研磨材の砥粒に与えるべき軌跡について考察する。さらに砥粒の擦過軌跡が得られた形状精度に及ぼす影響について検討する。

第7章では、Tiの鏡面加工を行う方法について具体的に検討する。まずTiの化学的活性がバフ研磨材加工に及ぼす影響について検討し、それが電解バフ複合加工に及ぼす影響を品質と加工能率の面から考察するとともに、Tiの鏡面加工を試みる。

第8章では、Alの鏡面加工を行う方法について具体的に検討する。まずAlの不働態化膜の特徴を検討し、それが電解バフ複合加工に及ぼす影響を品質と加工能率の面から考察するとともに、Alの鏡面加工を試みる。

第9章では、Cuの鏡面加工を行う方法について具体的に検討する。まずCuの不働態化膜の特徴を検討し、それが電解バフ複合加工に及ぼす影響を品質と加工能率の面から考察するとともに、Cuの鏡面加工を試みる。

第10章は以上をまとめた結言である。

第2章 電解加工、バフ研磨材加工の機構と加工性能

2-1 緒 論

本章においては電解バフ複合加工の加工機構を解明するために、この加工法の基礎となっている電解加工とバフ研磨材加工について、それぞれ単独で用いられた場合の加工機構および加工能率と加工精度について概略的に考察する。

電解加工は電解反応、すなわち電解質水溶液中の電極界面で生じる化学反応に伴う除去作用（溶出）を利用する加工法である。この反応は、電極と水溶液中のイオンの間で電子が授受されることによって生じる。電解による除去は原理的には、陽極の酸化反応に伴う金属のイオン化溶出である。酸素酸塩型の電解液中では、イオン化は同時に陽極の不働態化の原因になり、陽極に不働態化膜が生成されると、金属の溶出が妨げられる。しかしこの不働態化膜の生成機構についてはほとんど解明されていない。

バフ研磨材加工*は剛性の小さいバフ研磨材の表面に保持されている砥粒による除去作用を利用する加工法である。この除去は砥粒擦過による微小切削によって、塑性変形が繰返されるのに伴う材料の破壊と離脱によって生じる。バフ研磨材加工によってかなりよい鏡面が得られるので、従来から研磨用として多用されている。しかし、その構造が除去作用に及ぼす影響についてはほとんど解明されていない。

電解バフ複合加工は、これら二つの加工法を複合させた加工法である。すなわち砥粒で工作物を擦過しながら電解作用で金属を溶出させる加工法である。この加工機構については木本により、「不働態化膜が砥粒の擦過作用で除去され、露出した金属素地へ電解電流の集中が生じ、それによって金属の溶出が促進される」という仮説が提唱されている⁸⁾。この説によって、電解バフ複合加工による工作物の除去、表面粗さの生成機構をある程度定性的に説明することができる。しかし砥粒の擦過作用と電解作用の複合作用がもたらす加工機構についてはほとんど解明されていない。

脚注 * ここでいうバフ研磨材とは、砥粒が繊維状の基材に固着された構造のものである。一般にバフ加工とは遊離砥粒を用いた加工法をさすので、区別するためにバフ研磨材加工ということとした。

本章の構成は次のようになっている。2-2節では、電解加工における加工機構と加工性能について考察し、2-3節ではバフ研磨材加工における加工機構と加工性能について考察する。2-4節では、電解加工とバフ研磨材加工を複合させた場合の加工機構と加工性能について概略的に考察する。2-5節は以上をまとめた結論である。

2-2 電解加工

2-2-1 加工機構

(1) 電解反応

酸、塩基あるいは塩類は、水に溶けると陽イオンと陰イオンに解離する。この水溶液は電気伝導性を有し、電解質水溶液（以後、電解液という）と呼ばれている。

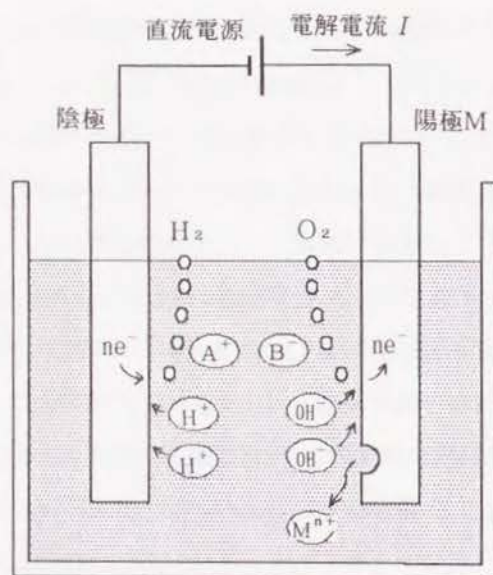
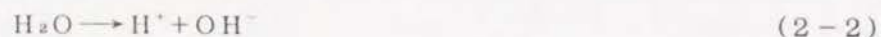


図2-1 電解槽のモデル

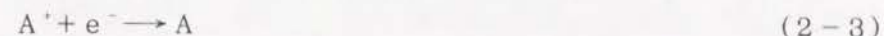
いま、図2-1に示すような電解槽のモデルを考える。電解質ABの水溶液中に一对の電極を浸漬し、電極に直流電圧を印加すると水溶液中では水と電解質が解離して



で表される4種類のイオンが存在する。直流電圧の印加により水溶液中の電極間には電界が形成される。

この電界により陽イオンは陰極へ、また陰イオンは陽極へ移動する。電極界面では、電極とイオンの間で電子が授受されることによる電気化学反応（以後、電解反応という）が生じる。陰極の反応は、陽イオンに電子を与える還元反応である。逆に陽極の反応は、陰イオンから電子を奪う酸化反応である。

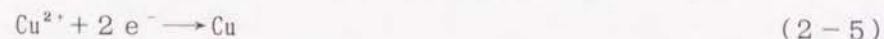
陰極の還元反応は、元素Aのイオン化傾向が水素より小さい場合には



となり、元素Aが析出する。逆に、水素のイオン化傾向が元素Aより大きいと



となり、 H_2 が発生する。たとえばPt電極を用いて $CuSO_4$ 水溶液を電解すると、水溶液中の陽イオン Cu^{2+} 、 H^+ は陰極へ移動する。陰極では、イオン化傾向の小さい Cu^{2+} が



として還元されてCuが析出する。また $NaNO_3$ 水溶液などの酸素酸塩型の電解液を用いると H^+ が還元されて

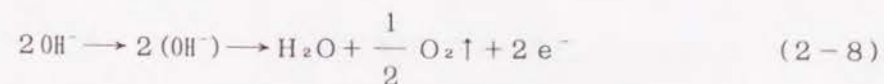


の反応が生じる。

一方、陽極では電解質の解離によって生じた陰イオン B^- が OH^- より放電しやすい場合には



の反応が生じる。また陰イオン B^- が根の場合、陽極と電解液の界面では OH^- の放電により



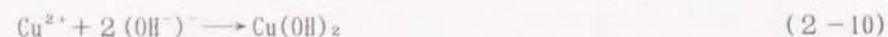
の反応が生じて O_2 が発生する。さらに陽極の金属M自体は



の反応によりイオンになって溶出する（以後、陽極溶出と呼ぶ）。

なお式(2-8)中の $2(OH^-)$ は反応性の高い中間生成物で金属Mを酸化する。たと

例えばCuを電極に用いてCuSO₄水溶液を電解すると陽極では



の2段階の反応が生じる。Cuは溶解してイオンになり、イオン化で生じた余剰電子は陽極を通じて直流電源に流入する。

なお電解反応により生成される金属の量と電気量の関係は、電気分解に関するファラデーの法則で表され、生成する金属Mの質量（以後、材料除去量という）を W [g]、電解電流を I [A]、時間を t [s]、金属Mの当量を M [g]、Mの原子価を n とすると

$$W = I \cdot t \cdot M / 96500 \cdot n \quad (2-12)$$

の関係になる。また単位電気量あたりに生成する金属Mの質量を κ [g/C]とすると

$$\kappa = M / 96500 \cdot n \quad (2-13)$$

となり、 κ は金属Mの電気化学当量といわれる。

なお陰極と陽極が図2-2に示すような位置関係にある場合、電解電流 I は式(2-14)で表せる。

$$I = \frac{V_g \cdot A_e}{\rho_e \cdot l_g} \quad (2-14)$$

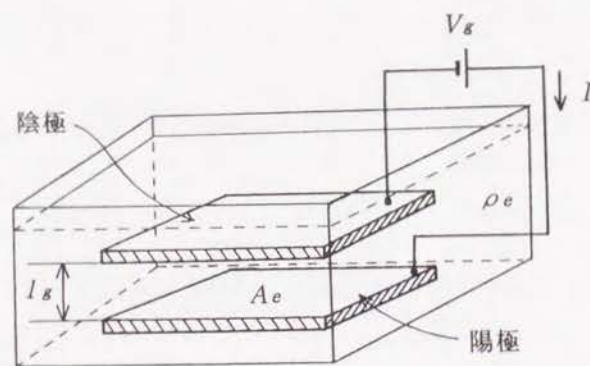


図2-2 陰極と陽極の位置関係

ここで A_e [cm²]は陽極と陰極の面積、 ρ_e [Ω・cm]は電解液の抵抗率、 l_g [cm]は陽極と陰極間の距離（以後、電解ギャップという）、 V_g [V]は両極間の電位差（以後、ギャップ電圧という）である。また陽極と陰極の電流密度 J ($= I / A_e$) [A/cm²]を定義すると、電流密度 J と陽極溶出により生成する金属Mの単位時間あたりの質量（以後、材

料除去率という） w ($= W / t$) [g/s]の関係は

$$w = \frac{V_g \cdot A_e}{\rho_e \cdot l_g} \cdot \kappa = J \cdot A_e \cdot \kappa \quad (2-15)$$

となる。

(2) 分極と不働態化

水溶液の電解ではギャップ電圧 V_g と電流密度 J の関係は、例えば陽極にステンレス鋼SUS304を用いた場合には、図2-3のようになる⁸⁾。図中の領域Aではギャップ電圧 V_g の増加に対する電流密度 J の増加はきわめて少なく、電極に何の変化もない（以後、領域Aを不働態化域という）。領域Bでは電流密度 J は徐々に増大して両極からガスが発生する。さらに領域Cではガスが盛んに発生して陽極溶出が生じる（以後、領域Cを過不働態化域という）。

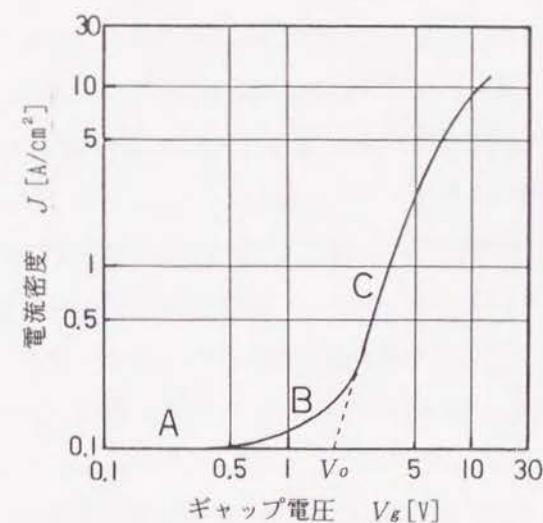


図2-3 ギャップ電圧と電流密度の関係^{*)}
(SUS304, 20%aq. NaNO₃)

このように電極の酸化、還元反応はある一定のギャップ電圧 V_g よりも大きい条件下において生じる。電解反応が生じるのに要する最小のギャップ電圧 V_g は分解電圧といわれ、図中の V_0 で与えられる。分解電圧 V_0 は用いる電解液、電極の種類等によって

変わる。

分解電圧 V_o が生じる原因は、電解に伴って電極で分極が起こるためである。分極とは、電極の近傍において電解電流 I の流れを抑制する何らかの電位障壁が生じる現象をいい、次に示すようなものがある⁹⁾。

- ① 濃度分極：電極近傍でイオンの濃度変化が生じることによる電圧降下
- ② 抵抗分極：陽極の不働態化によって抵抗性の不働態化膜が生成されることによる電圧降下
- ③ 活性化分極：陽極の溶出イオンに対して働く電位障壁による電圧降下

この中、抵抗分極は酸素酸塩型の電解液を用いた場合に生じやすい。

不働態化とは、金属の表面で生じる化学反応が、見かけ上ほぼ停止状態になることをいう。不働態化された表面は腐食し難く、材料によっては表面の色が変わることもある。不働態化を工業的に利用したものとしては、建築物の美観を向上させるために、外壁材用の金属に表面処理を施したものがある。

不働態化に関する研究は、各種金属の不働態化条件に関するもの、不働態化した金属の化学的な安定性に関するものなど多く行われている^{10)~11)}。しかし、金属がどのようにして不働態化し、その表面がどのようにになっているのかを研究した例は少なく、不働態化の機構は十分には解明されていない。

現在のところ金属が不働態化する原因は、電解によって金属の表面で化学反応が生じ、金属酸化物の薄膜（以後、不働態化膜という）が生成されるという考え方が有力である¹²⁾。鉄鋼材料が不働態化すると、表面が黒ずんで見えるのは不働態化膜が生成されているためで、その膜厚は、可視光線の波長（ $0.4 \sim 0.7 [\mu\text{m}]$ ）より小さいといわれている¹¹⁾。

不働態化は、陽極において生じる金属の溶出と陽極と電解液の界面で O_2 が発生することが原因となって起こる。陽極ではギャップ電圧 V_g に応じて式（2-8）と式（2-9）で表される二つの電解反応が生じる。これらの反応にともなって電子が授受されて、2種類の電解電流が流れる。1つは式（2-8）の反応にともなう電解電流 I_o で、他の1つは式（2-9）の反応にともなう電解電流 I_w である。実際に測定される電解電流 I は I_o と I_w の和で表される。

これら2種類の電解電流 I_o 、 I_w と陽極の単極電位の関係は図2-4で表される¹²⁾。

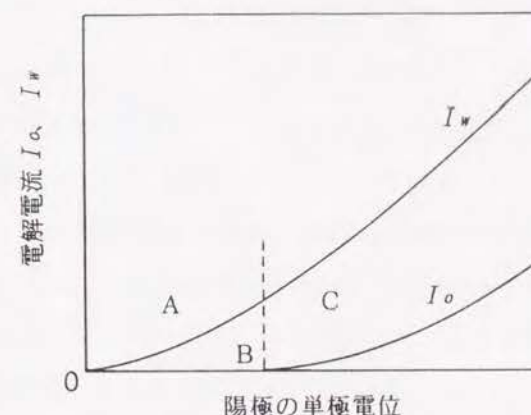


図2-4 陽極の単極電位と電解電流 I_o 、 I_w の関係

なお図2-4において横軸に示した陽極の単極電位とは、金属の電気化学的なポテンシャルを表し、これと陰極の単極電位との間の電位差がギャップ電圧 V_g になる。図2-4において陽極の単極電位が低い（ギャップ電圧 V_g が小さい）領域Aでは、陽極溶出が生じるため式（2-9）の反応にともなう電解電流 I_w が流れ、 I_w は単極電位の増加（ギャップ電圧 V_g が大きくなる）に比例して増大する。 O_2 が発生するのは、単極電位がネルンストの式によって表される酸素過電圧より大きくなった時点Bからで、それ以後は式（2-8）の反応にともなう電解電流 I_o が単極電位に比例して増大する。

実際の電解反応は酸素過電圧が電流密度 J 、陽極金属の材料、電解液の種類と濃度等によって著しく変化するので、陽極溶出と O_2 の発生が混在して生じる。このような状態において陽極の金属はきわめて酸化されやすく、反応で生じた酸化物が陽極の表面に付着し薄膜が生成される。生成される薄膜は電解液の種類、金属材料、単極電位によって化学的組成や電気的性質が異なり、現在次のような電気的性質を持つ薄膜が確認されている¹²⁾。

- (1) 抵抗性薄膜
- (2) イオン導電性薄膜
- (3) 電子導電性薄膜

これらの薄膜の中、(1)の抵抗性薄膜が生成されると電解電流が流れにくくなり、陽極溶出が抑制されるので、前述のようにこの薄膜は不働態化膜と呼ばれている。

2-2-2 加工性能

まず電解加工の加工能率について考える。図2-5はステンレス鋼SUS304を陽極とし、 NaNO_3 水溶液を電解した場合に測定された電流密度 J と材料除去率 w の関係を示す^{*)}。図中の破線は溶出が式(2-15)に基づいて生じると仮定した場合の計算値である。

電解液として H_2SO_4 などの酸性の液を用いると、陽極は不働態化しにくいので電流密度 J と材料除去率 w の関係は、この破線で示されるような関係になる。実線は電解液として酸素酸塩型の NaNO_3 水溶液を用いた場合を示す。電流密度 J が $1 [\text{A}/\text{cm}^2]$ 以下の領域では、陽極が不働態化して溶出が抑制されるため材料除去率 w は計算値よりかなり小さくなる。

次に表面粗さについて考察する。電解加工においては陽極の表面に存在する微小な凹凸は、凸部の電流密度 J が凹部に比べて大きく、溶出されやすいために平滑化が進む。これは式(2-15)において凸部では電解ギャップ l_g が小さくなって、その部分の電流密度 J が増大するためである。電解液として H_2SO_4 などの酸性の液を用いた場合には、ほぼこの機構に基づいて表面が平滑化されるが、ある程度表面が滑らかになるとそれ以上には平滑化は進まない。これは表面の平滑化がある程度進むと凸部と凹部の電解ギャップ l_g の値に有為な差がなくなるためである。木本らはギャップ電圧 V_g を印加した場合に形成される陽極表面の電場解析を行っているが、その結果によると凸部の電流密度 J が凹部に比べて有為に大きくなるためには、最低 $2 [\mu\text{m}]$ 以上の凹凸が必要とされる¹³⁾。これより電解加工で得られる表面粗さは $R_{\text{max}} 2 [\mu\text{m}]$ が限界となる¹⁴⁾。

酸素酸塩型の電解液を用いた場合には、不働態化によって陽極溶出が抑制されるために、加工された表面の状態は酸性の電解液を用いた場合とはかなり異なる。電解液として酸素酸塩型の NaNO_3 水溶液を用いてステンレス鋼SUS304の電解加工を行った時に測定された、電流密度 J と表面粗さの関係を図2-6に示す。電流密度 J が $1 [\text{A}/\text{cm}^2]$ 以下の領域では、不働態化により陽極溶出が抑制されるため表面粗さは前加工面のままで変化しない。電流密度 J が $1 [\text{A}/\text{cm}^2]$ 以上の過不働態化域になると表面粗さは前加工面のものより大きくなって表面が荒れる。これは第3章の3-3-1で述べるように、酸素酸塩型の電解液を用いた場合には陽極溶出は陽極表面の限られた所でのみ局所的に生じるため、表面は不均一な凹凸からなる梨地面になり、滑らかな表面は得られない。

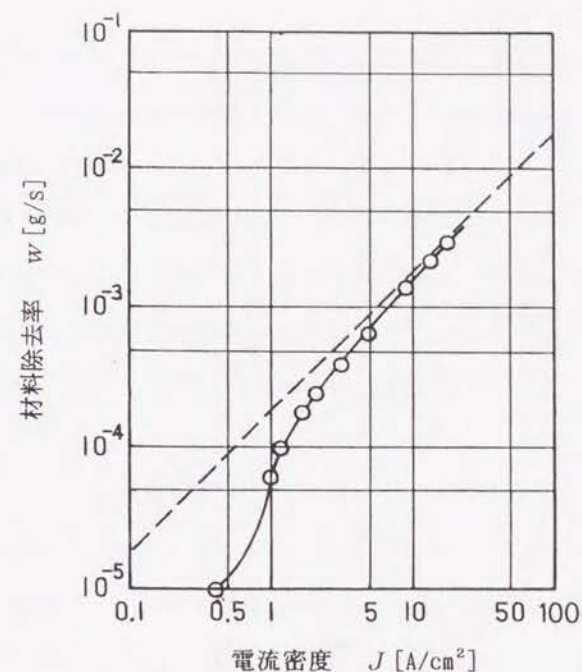


図2-5 電解加工における電流密度と材料除去率の関係^{**) (SUS304, 20%aq. NaNO_3)}

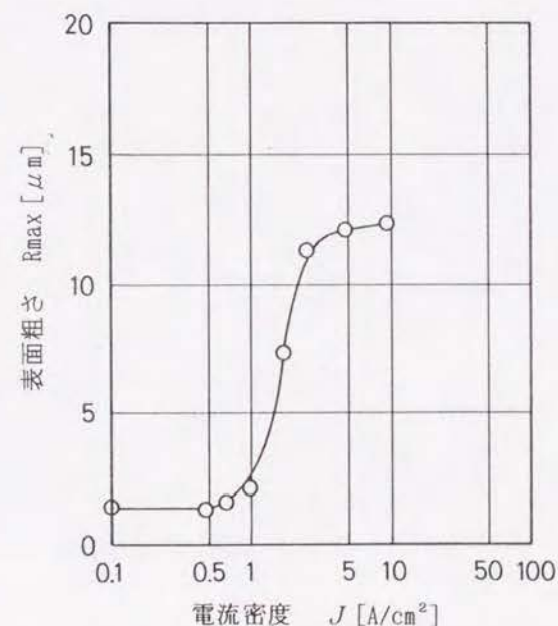


図2-6 電解加工における電流密度と表面粗さの関係 (SUS304, 20%aq. NaNO_3)

次に電解加工によって得られる形状精度について考察する。荒井らが形彫りのために行った電解加工において、電解液を供給するための貫通穴を設けた陰極を平面工作物と対向させると、加工面のプロフィールは図2-7のようになった¹⁵⁾。電解液が噴出する所では、電解液の流速が大きいことおよびこの付近の電流密度が高いために工作物は多く除去されている。陰極と対向しない部分でも電気力線の広がりのために漏れ電流が流れて大きくだれが生じている。この例に示すように電解加工においては陰極の形状を精度良く工作物に転写加工するのはきわめて難しく、電流密度 J や電解液の流速の分布の影響を受けやすい¹⁶⁾。

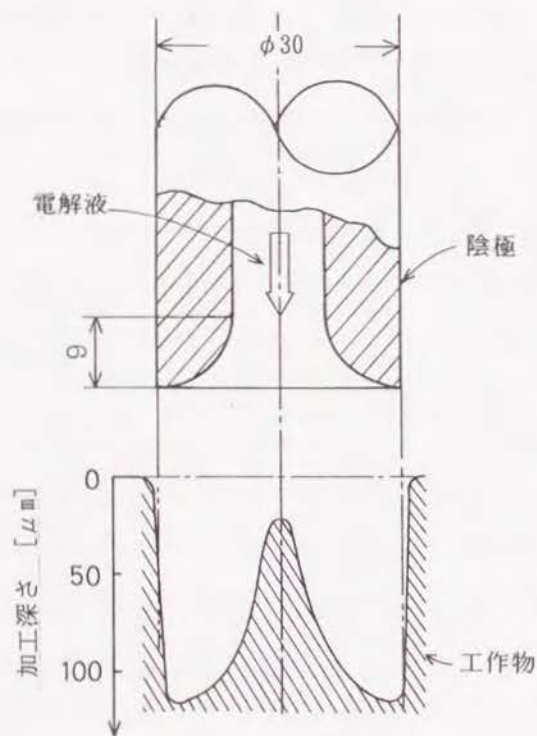


図2-7 電解加工で加工された平面工作物のプロフィール¹⁵⁾
(SUS304, 20%aq. NaNO_3 , $I = 6$ [A], $t = 5$ [min])

2-3 バフ研磨材加工

2-3-1 加工機構

(1) バフ研磨材の構造と性質

砥粒を用いて材料の表面を平滑に仕上げる加工法は一般に研磨加工と言われている。研磨加工は部品に要求される品質の内、表面粗さのみを良くする加工方法を言い、寸法精度、形状精度をも含めて良くする研削加工法とは区別されている。

砥粒の微小切刃で工作物を除去する研磨加工用の工具としては従来からバフ研磨材が多用されている¹⁷⁾。この研磨材はナイロンなどの繊維を基材として不織布を構成し、繊維を固着剤で覆って、砥粒を保持するようにしたものである。図2-8は市販のバフ研磨材の構造を観察した電子顕微鏡写真である。基材の繊維は固着剤で覆われて、その表面に砥粒が保持されている。また繊維が交差する部分には、固着剤が凝集した塊がみられる。バフ研磨材中には、砥粒はこのような分布状態で立体的に配置されている。

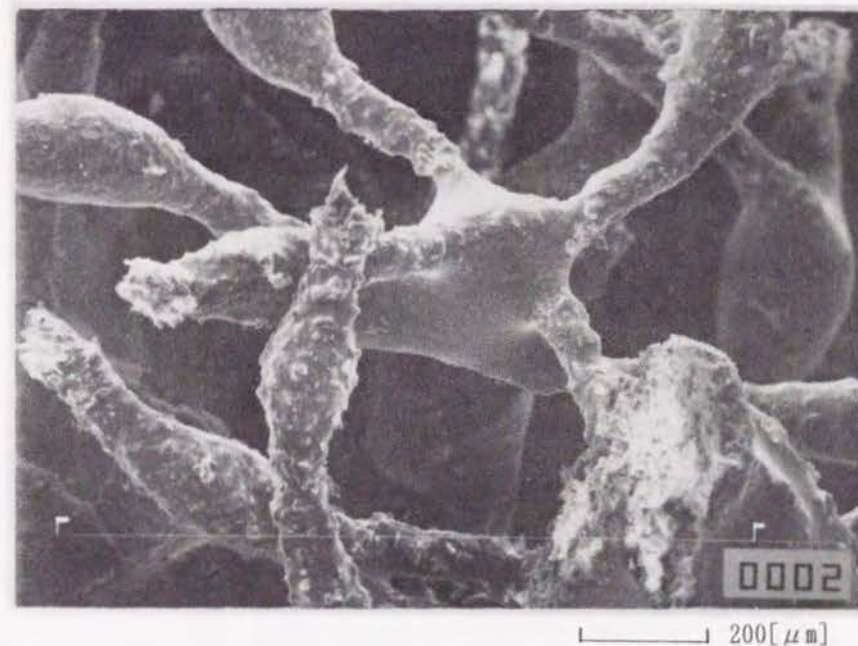


図2-8 バフ研磨材の構造

図2-9は、砥粒が保持されている構造を模式的に表したものである。基材の繊維は、繊維の長手方向または長手方向に対して垂直方向に力が加わるとたわみ、剛性の小さいバネとして機能する。したがって砥粒は複数個のバネで保持されている。パフ研磨材に外力が加わると、基材のバネはたわみ変形を起こしパフ研磨材全体が変形する。

図2-10にパフ研磨材の厚み方向に荷重を加えた場合の、荷重 F と研磨材の変形量 λ の関係を測定した結果の一例を示す。ただし変形の時間遅れを無視した静的な関係を示す。なお、荷重を加えない状態における研磨材の初期の厚さは9~10[mm]であった。図2-10において、パフ研磨材に加えた荷重 F と変形量 λ の関係は直線的ではなく、荷重 F が増加するにつれて変形量 λ の増加の割合は次第に減少している。これは荷重 F が小さい場合には、図2-11(b)に示すように基材にまだ十分な変形余裕があるが、荷重 F が増すと同図(c)のように上下の基材同士が接近して変形余裕が小さくなるためと思われる。

なお図2-10において、荷重 F が同じ場合、砥粒の粒度が小さい（砥粒の粒径が大きい）ものほど変形量 λ が少ないのは、粒径の大きい砥粒を保持するために線径の太い基材が用いられるため、基材のバネ定数が大きいためである。

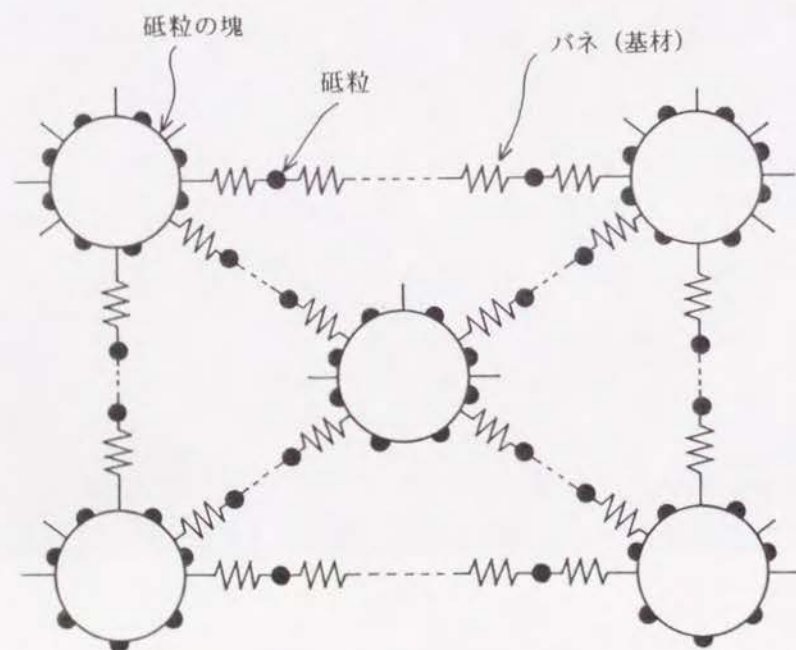


図2-9 パフ研磨材の構造の説明図

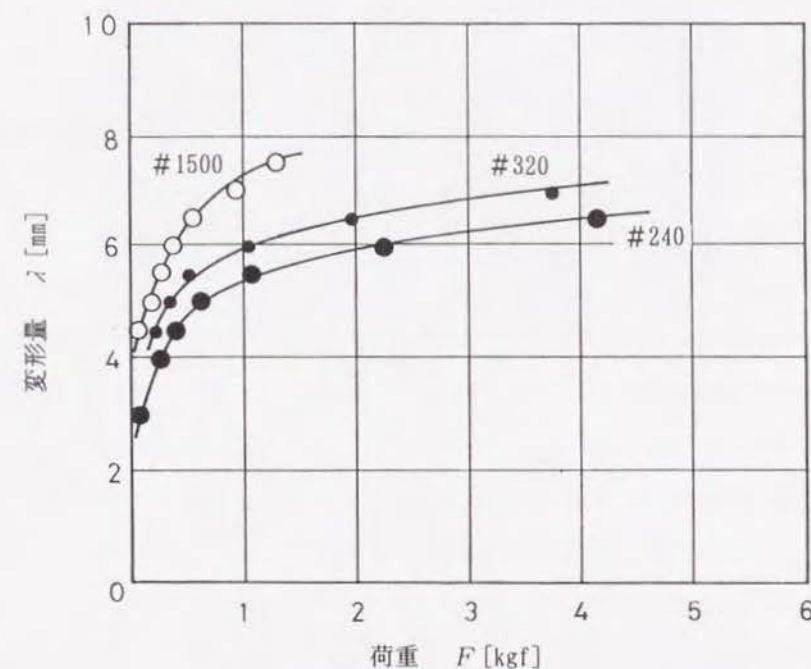


図2-10 パフ研磨材に加えられた荷重と変形量の関係
(パフ研磨材の面積 1 [cm²])

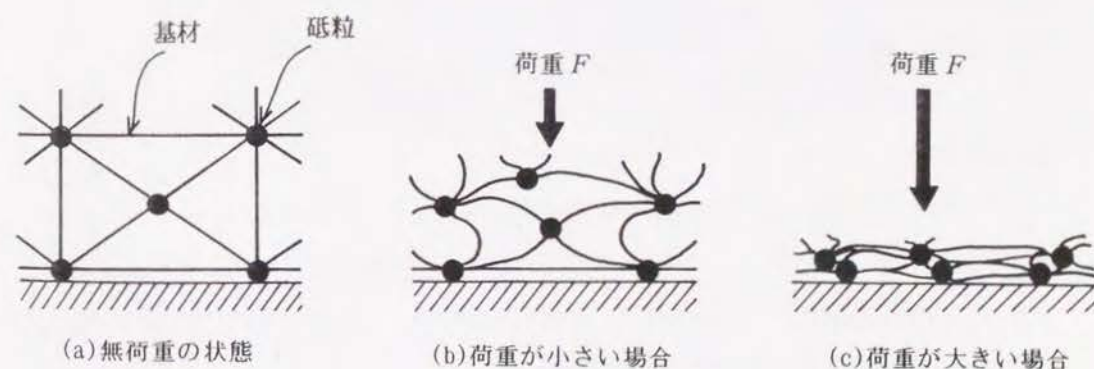


図2-11 荷重が加えられた場合のパフ研磨材の変形状態

(2) バフ研磨材の擦過作用

バフ研磨材に荷重 F が加えられて基材が変形すると、工作物と接する面においては単位面積当たりの砥粒の数（以後、砥粒密度という）が増加する。この増加の割合を調べるために、ステンレス鋼SUS304の表面を擦過し、表面に形成される微小な擦過条痕を触針式の表面粗さ計を用いて測定した。

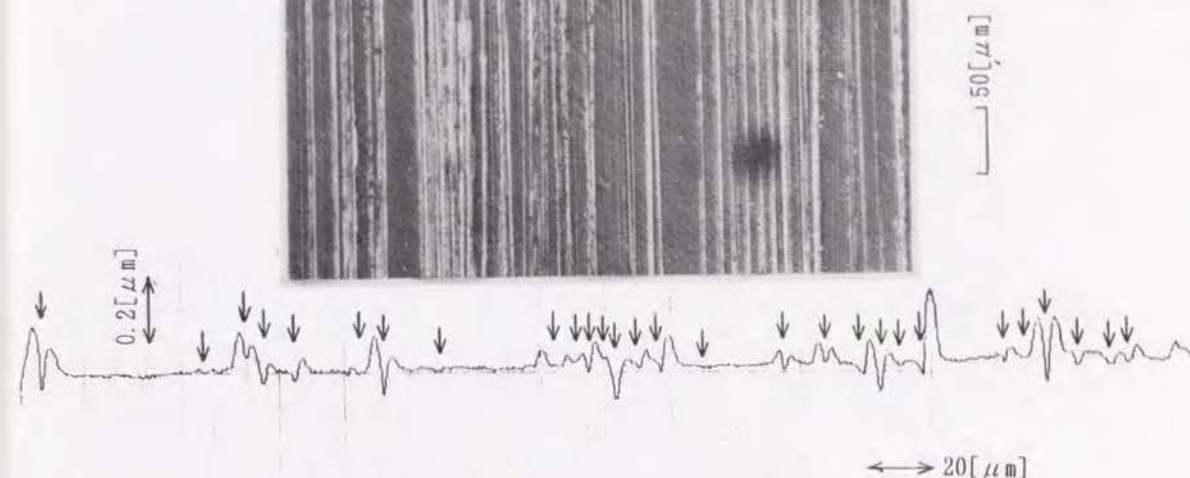
擦過する前のステンレス鋼SUS304の表面粗さは $R_{\max} 0.1 [\mu\text{m}]$ 以下であった。バフ研磨材に押し付けた工具の単位面積当たりの荷重 $P_F = 2 [\text{kgf}/\text{cm}^2]$ と $P_F = 0.2 [\text{kgf}/\text{cm}^2]$ で擦過したときに測定された表面のプロフィールを図2-12に示す。擦過条痕は砥粒の擦過作用によってできた溝、掘り起こし作用によってできた溝の周囲の盛り上がりから形成され、同図(a)に示した $2 [\text{kgf}/\text{cm}^2]$ と荷重が大きい場合は同図(b)の $0.2 [\text{kgf}/\text{cm}^2]$ と荷重が小さい場合に比べて、擦過条痕間の間隔が狭い。

次に多数の擦過条痕がどのような過程で形成されるかを調べてみた。図2-13は粒度 #320 のバフ研磨材を用いて、単位面積当たりの荷重 $P_F = \text{約} 4 [\text{kgf}/\text{cm}^2]$ でステンレス鋼SUS304の表面を擦過した場合において、擦過条痕の形成初期の状態を示した金属顕微鏡写真である。図中に矢印で示した点は1個の砥粒の擦過で形成された擦過条痕の始点である。この始点同士の間隔は $0.2 \sim 0.5 [\text{mm}]$ になっており、後述する砥粒密度 m_s から推定される間隔とはほぼ一致している。

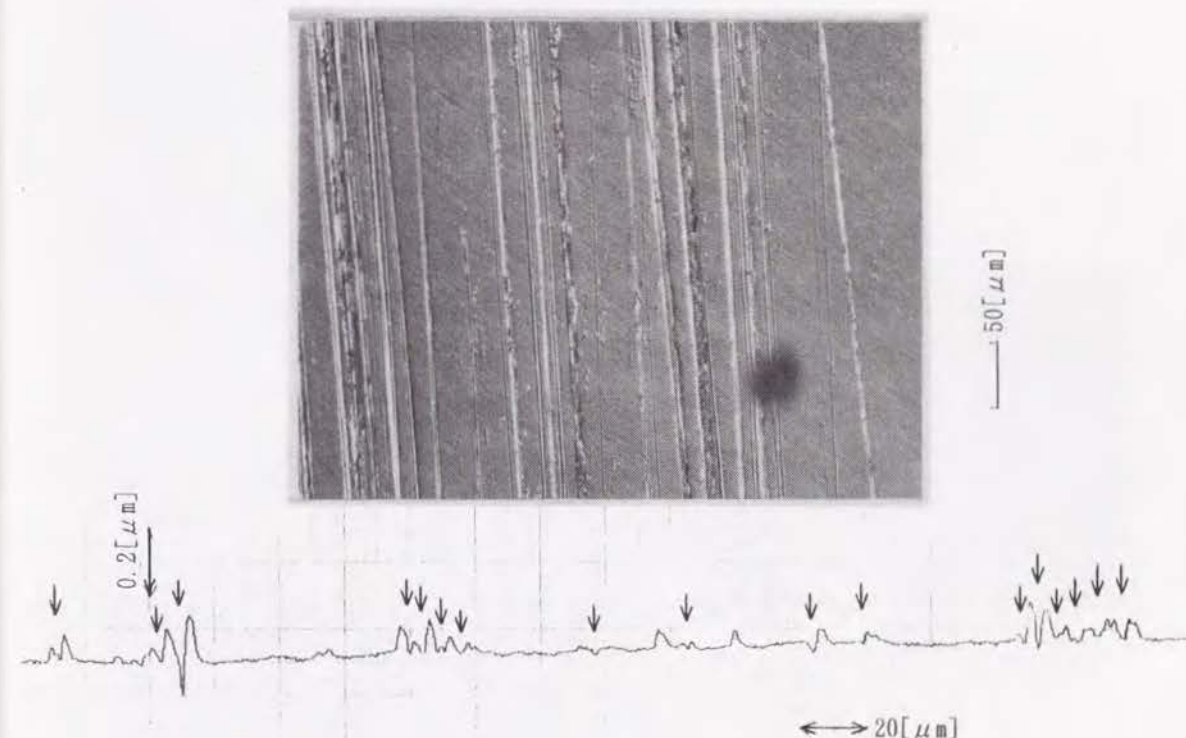
工作物を擦過するバフ研磨材の長さが長くなる（図中右に向かう）につれて、1個1個の砥粒によって形成される擦過条痕の間隔が狭まり、多数の擦過条痕が形成される様子が分かる。なお擦過条痕の間隔が密になってくると、擦過条痕の一部が互いに重なりあってくる。図2-14はその様子を示したもので、図に示したA、Bの部分では複数の擦過条痕による2度削りが生じているのが分かる。

以上に示した擦過条痕の形成過程の解析結果から、擦過条痕は図2-15に示すモデルのように形成されるといえる。すなわち擦過条痕は、バフ研磨材の表面に2次元的にランダムに分布した砥粒が工作物を擦過しながら移動することによって形成され、条痕の間隔が密になってくると部分的に2度削りが生じる。

砥粒密度 m_s は表面のプロフィールの測定結果から次のようにして求められる。すなわち幅 $s [\text{cm}]$ の工作物上を、長さ L_r のバフ研磨材が擦過した場合、形成される擦過条痕の数 M_s [個] は、バフ研磨材の砥粒密度を m_s [個/ cm^2] とし、全ての砥粒が擦過条



(a) 単位面積当たりの荷重 $P_F = \text{約} 2 [\text{kgf}/\text{cm}^2]$ の場合



(b) 単位面積当たりの荷重 $P_F = \text{約} 0.2 [\text{kgf}/\text{cm}^2]$ の場合

図2-12 バフ研磨材による擦過条痕（矢印の箇所）
（#1500の研磨材でステンレス鋼SUS304を擦過した場合）

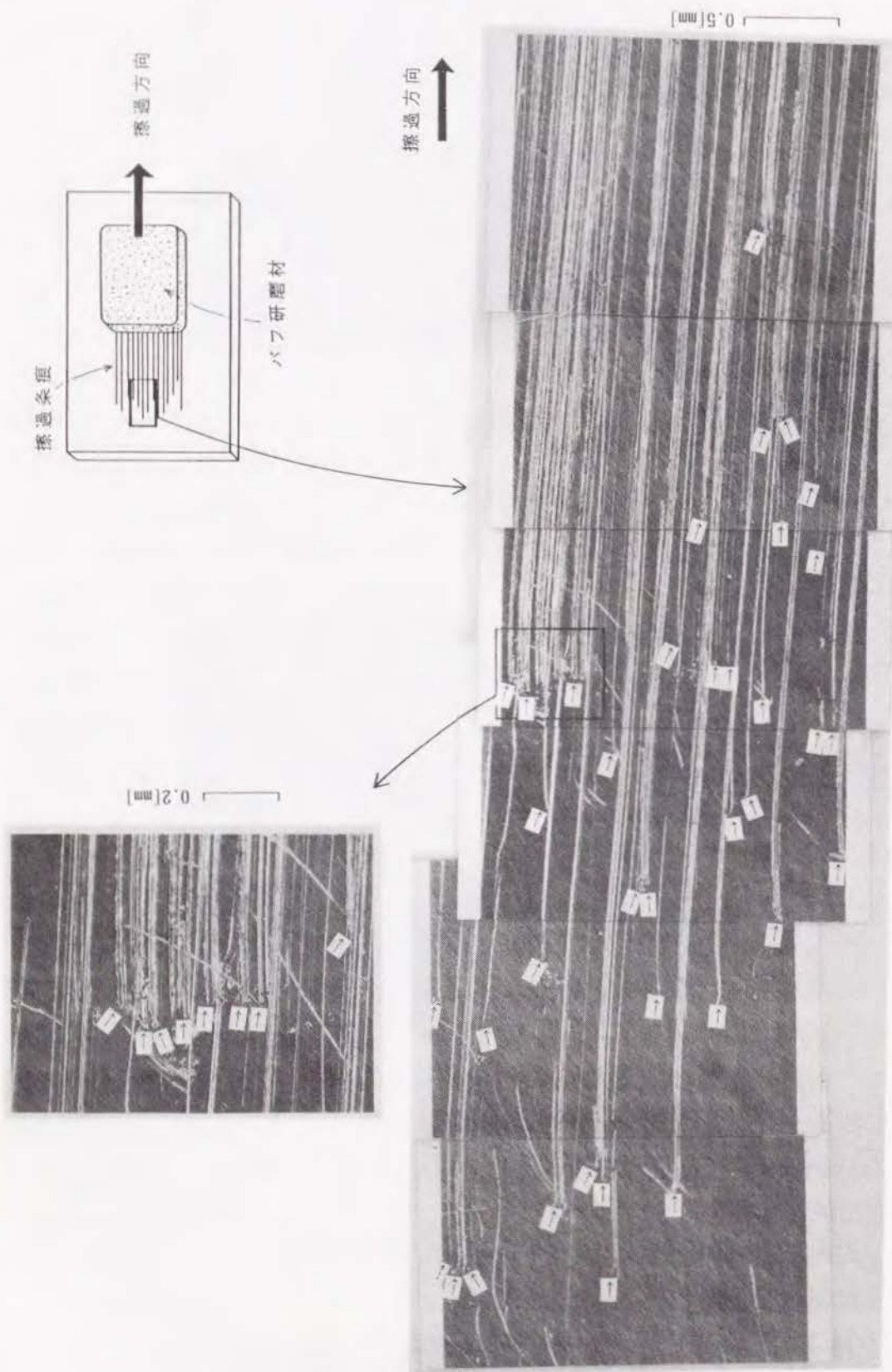


図 2-13 バフ研磨材で SUS304 を研磨した場合の研磨条痕の形成初期の状態

痕を形成すると仮定すると、

$$M_s = m_s \cdot s \cdot L_r \quad (2-16)$$

となる。砥粒密度 m_s は、表面のプロフィールの測定区間 s 内の研磨条痕の数 M_s を求めることによって式 (2-17) より推定できる。

$$m_s = M_s / s \cdot L_r \quad (2-17)$$

ここで長さ L_r はあらかじめ測定しておく。

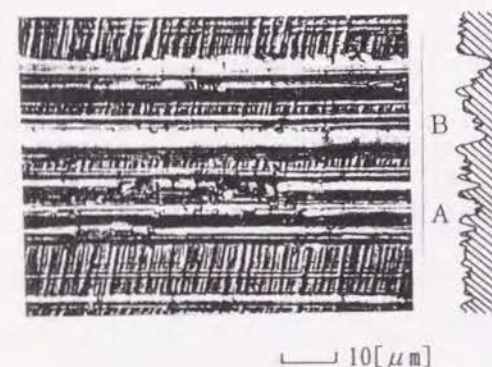


図 2-14 複数の研磨条痕によって 2 度削りが生じている状況

図 2-16 は測定された荷重 F と砥粒密度 m_s の関係を示すが、荷重 F の増大につれて砥粒密度 m_s が増加する傾向が確かめられた。砥粒が剛性の高い結合剤で保持された研削砥石の場合、砥粒の間隔は平均粒径の 1~2 倍になるといわれる¹⁷⁾。これに基づいて図 2-16 の測定に用いたバフ研磨材と、同等の粒径の砥粒をもつ研削砥石の砥粒密度 m_s を推察すると、粒度 #320 の平均粒径は約 $50[\mu m]$ であ

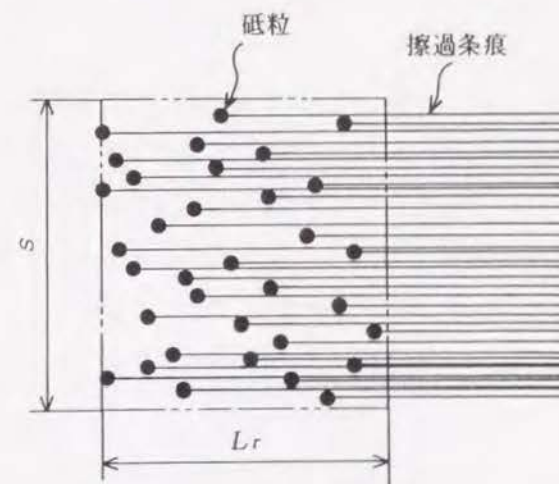


図 2-15 研磨条痕の形成モデル

るので、砥粒密度 $m_{\#}$ は 10^7 [個/cm²] のオーダーになる。粒度 #320 の砥粒が固着されたバフ研磨材を荷重 $F = 1$ [kgf/cm²] で用いた場合の砥粒密度 $m_{\#}$ は 10^2 [個/cm²] のオーダーになるので、バフ研磨材の砥粒密度 $m_{\#}$ は研削砥石に比べて約 5 桁小さいことが分かる。

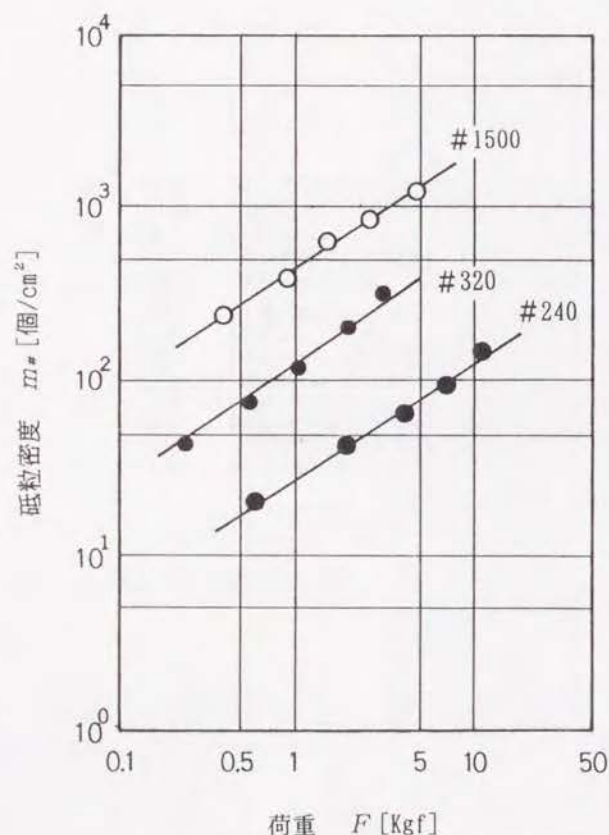


図2-16 バフ研磨材の砥粒密度
(バフ研磨材の面積 1 [cm²])

2-3-2 加工性能

バフ研磨材加工の加工能率についてはほとんど測定例がない。これは従来から生産現場において、バフ研磨材は表面の粗さのみを改善するための工具として用いられてきて、組織的な研究が行われていないためである。バフ研磨材にどのような運動を与えて、どの程度の荷重を加えながら加工すると、工作物はどの程度除去されるかについては作業者の経験に頼っていた。そこでまずバフ研磨材の材料除去率を実際に測定してみること

とした。

方法として第3章の3-2-1で述べる回転円盤型の工具に粒度 #320 のバフ研磨材を装着してステンレス鋼SUS316を加工し、加工前後の工作物の重量差と加工時間から材料除去率 w を求めた。その結果、ステンレス鋼SUS316は加工時間 8 [min] で約 0.2 [g] だけ除去された。この値から単位面積当たりのバフ研磨材が単位時間あたりに除去する工作物の除去量 W_l [g/min·cm²] (以後、単位面積当たりの材料除去率という) を計算すると、 $W_l = 0.14$ [mg/min·cm²] という値が得られた。なおバフ研磨材の面積は、直径 15 [cm] の回転円盤を用いているので 176 [cm²] となる。

バフ研磨材の単位面積当たりの材料除去率 W_l を、構造がバフ研磨材に近いベルト研削用の研磨布紙のものと比較してみる。ベルト研削用の研磨布紙はベルト状の布の表面に砥粒を固着させたもので、工作物を加工する際にはコンタクトローラと呼ぶ弾性体を研磨布紙に押し付けながら荷重を加え、かつ研磨布紙を高速で回転させて砥粒に運動エネルギーを与える。ベルト研削はバフ研磨材と同様に平面や曲面など様々な形状の工作物に対して研磨加工が行え、かつ機械化するのが比較的容易なため多用されている。粒度 #320 の研磨布紙を用いてステンレス鋼SUS304をベルト研削で研磨加工した場合の研磨布紙単位面積当たりの材料除去率 W_l は約 0.6 [g/min·cm²] になる¹⁷⁾。

このようにして得られた単位面積当たりの材料除去率 W_l は、バフ研磨材加工とベルト研削では砥粒に与える運動が異なるので厳密な比較はできないが、バフ研磨材の加工能率はかなり低いといえる。

次にバフ研磨材加工の加工精度について考える。砥粒加工においては一般に、工作物の表面粗さは一つ一つの砥粒のくい込み量 h_d に大きく影響され、くい込み量 h_d が大きいほど表面粗さがわるくなる。バフ研磨材は砥粒が剛性の小さい基材で保持されているので、砥粒のくい込み量 h_d は $0.01 \sim 1$ [μ m] ときわめて小さい。そのため表面粗さは同じ粒度の砥粒を用いた場合でも、他の砥粒加工法のものより良くなる。

しかし基材の低剛性は工作物の形状精度に対しては悪影響を及ぼす。すなわち工作物の下地に周期が長くて振幅の大きい凹凸がある場合、基材はこの凹凸に沿って変形するため砥粒は凹凸部に平均してくい込むため、工作物全体が均一に擦過されやすい。その結果、表面には下地の周期が長い凹凸が表面に残りやすく、形状精度を確保することが難しくなる。

2-4 電解バフ複合加工

2-4-1 加工機構

電解バフ複合加工では、図2-17に示すように陰極と陽極（工作物）を構成させる。陰極には金属製の円盤が用いられており（以後、回転円盤型複合工具電極という）、その下面にはバフ研磨材が装着されている。円盤を回転させるとバフ研磨材も同時に回転して工作物を擦過する。酸素酸塩型の電解液を複合工具電極の貫通穴から供給しながらギャップ電圧 V_g を印加すると、工作物は砥粒の擦過作用と電解作用を同時に受ける。

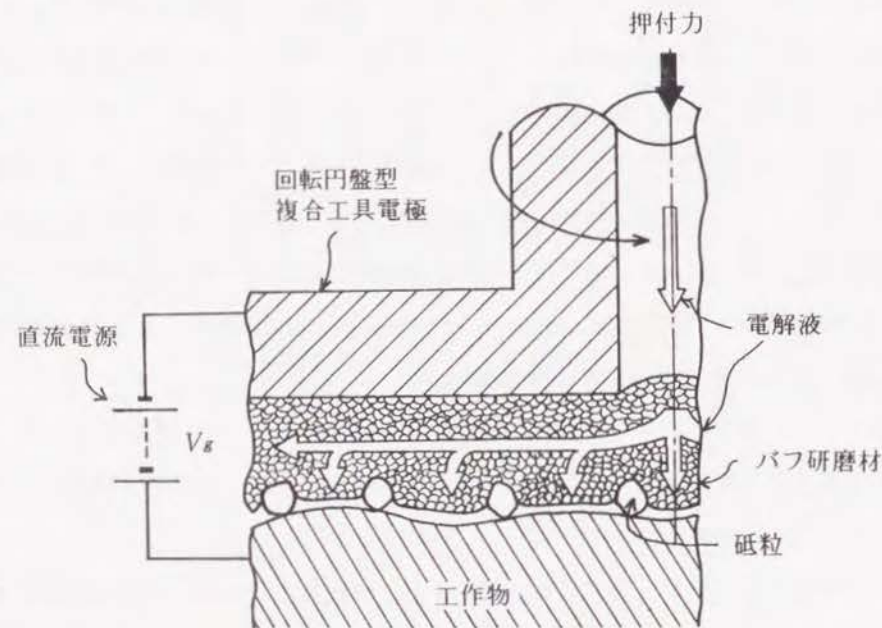


図2-17 電解バフ複合加工で平面状の工作物を加工する方法

この方法で加工する場合、工作物の表面では1個の砥粒の擦過前後で3ページで述べた3つの現象、①不働態化膜の生成、②不働態化膜の除去、③陽極の溶出が繰り返し生じると従来からいわれてきた⁸⁾。

①の不働態化膜の生成は、素地が露出している工作物の表面に電解作用で不働態化膜が生成されるために生じる。この場合、不働態化膜は2-2-1で述べたように金属の溶出と O_2 の発生が原因となって生成されるため、素地が不働態化膜で覆われるまでに時間の遅れ（以後、不働態化膜の生成に要する時間という）がある。

②の不働態化膜の除去は、バフ研磨材の砥粒が不働態化膜の膜厚 h_m より大きいくい込み量 h_d で工作物を擦過した場合に生じる。この場合擦過によって素地が露出する。

③の陽極溶出は、工作物である金属が電解作用によって溶出するために生じるが、表面に不働態化膜が生成されると溶出が抑制される。

次に電解バフ複合加工の際に生じる現象のモデルを図2-18に示す。このモデルを用いて①、②、③の現象が生じる過程について考察する。なお同図において工作物の表面は、まず電解作用によって不働態化膜が生成されているとし、砥粒の擦過作用はそれ以後に与えられるものとする。工作物が砥粒Aで擦過されると、砥粒のくい込みによって②の不働態化膜の除去が生じ、それとともに素地の一部は除去される。素地が露出した部分では、不働態化膜が生成されるまでには時間遅れがあるために③の陽極溶出が生じる。①の不働態化膜が生成された部分では、陽極溶出が抑制される（同図(a)）。

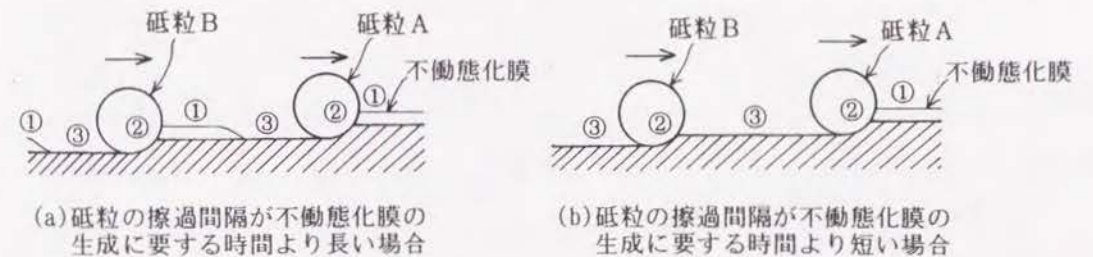


図2-18 電解バフ複合加工の際に生じる現象のモデル化

従来述べられてきた加工機構は、このような順番で3つの現象が繰り返されるというものであった⁸⁾。しかしバフ研磨材中には砥粒が多数存在しているので、工作物の表面は断続的に砥粒で擦過される。砥粒Aで擦過された表面が、その後砥粒Bで擦過されるまでの時間（以後、擦過間隔 t_m という）が不働態化膜の生成に要する時間より短い場合には、同図(b)に示すように常に素地が露出することになる。したがって3つの現象が繰り返し生じるかどうかは、擦過間隔 t_m と不働態化膜の生成に要する時間の大小関係によって決まる。

2-4-2 加工性能

加工機構の異なる複数の加工法を複合させる目的は、1 ページでも述べたように、それぞれの加工法を単独で用いた場合よりも加工能率、加工精度を向上させることにある。そこでまず従来の加工法において、どの程度の加工能率と加工精度が得られているかをステンレス鋼SUS304の加工を例にとって単位体積当たりの材料除去率 W_2 と表面粗さの関係としてまとめた結果を図2-19に示す。これらは各種の文献に記載されているデータをまとめたものである¹⁸⁻²⁰⁾。なおそれぞれの値は、生産加工を行っている現場において得られる平均値であり、装置機械の性能や作業者の熟練度によって幾分変動する。

単位体積当たりの材料除去率 W_2 が最も小さいのはバフ加工及びバフ研磨材加工であり、以後はポリッシング、ラッピング、電子ビーム加工と電解加工、放電加工、切削加工と研削加工の順に大きくなる。表面粗さは単位体積当たりの材料除去率 W_2 にほぼ比例してわるくなる。最も表面粗さを良くできるのはバフ研磨材加工である。この図から分かるように、加工能率が高い加工方法は加工精度が悪く、加工能率と加工の品質を両立させるのは非常に難しい。

バフ研磨材加工と電解加工を比べると、バフ研磨材加工の方が電解加工より単位体積当たりの材料除去率 W_2 が小さく表面粗さも良い。バフ研磨材加工では、工作物は砥粒の擦過作用により切り屑として除去される。電解加工では、工作物は原理的には数個の原子単位で除去される。したがって工作物の除去単位としてはバフ研磨材加工の方が大きい。しかしバフ研磨材の砥粒密度 m_s は2-3-1で述べたように $10 \sim 10^3$ [個/cm²] と小さいため、擦過による除去は工作物上のごく限られた所でのみ生じる。これに対して電解加工の場合には、工作物は陰極と対向する部分全面にわたって除去されるので、わずかな除去単位でも結果的に大きな単位体積当たりの材料除去率 W_2 が得られる。

電解バフ複合加工による工作物の除去が、2-4-1の加工機構で述べた3つの現象の繰り返しによって生じると考えると、工作物はバフ研磨材の砥粒の擦過作用で除去され、かつこの部分に電解電流 I が流れて陽極溶出による除去が加わる。その結果、単位体積当たりの材料除去率 W_2 はバフ研磨材加工のみによる場合よりも大きくなる。この場合の陽極溶出は不動態化膜がない状態で生じるので、過不動態化域の場合のように限られた所での溶出によって表面が荒れることはない。そのため電解バフ複合加工で得られる表面粗さは、バフ研磨材加工で得られる表面粗さと同等かそれより良くなるものと

思われる。以上により、電解バフ複合加工で得られる単位体積当たりの材料除去率 W_2 と表面粗さは図2-19で示す範囲になるものと期待される。

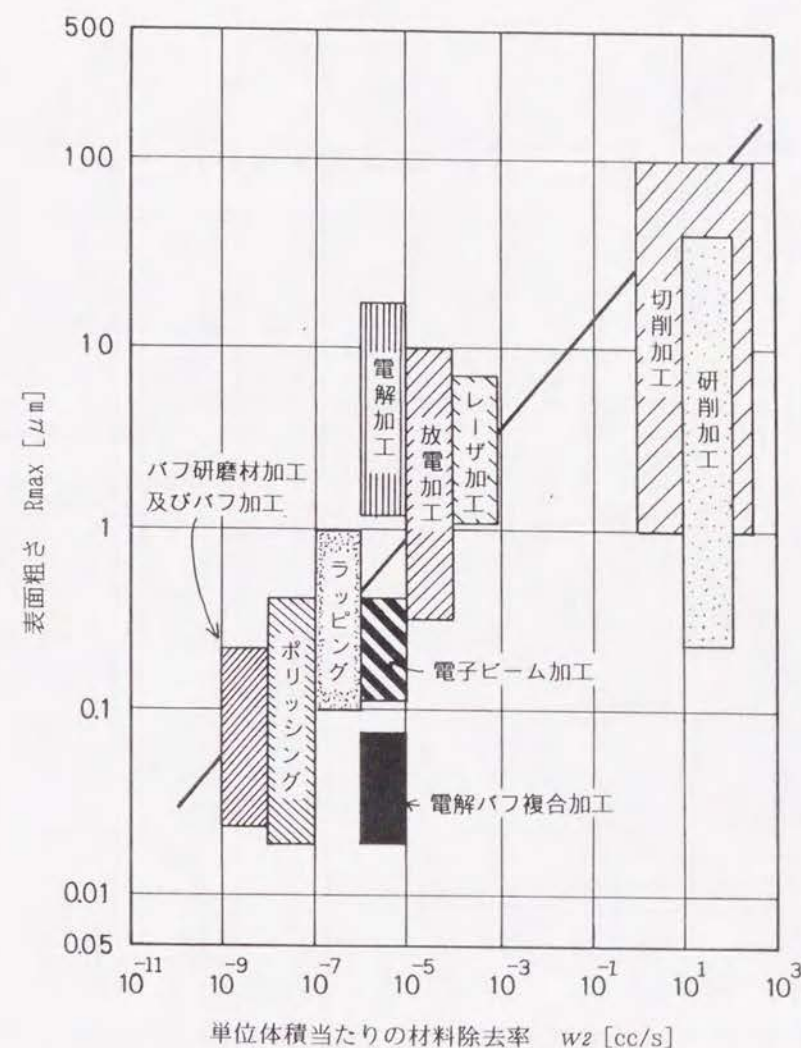


図2-19 各種加工法の単位体積当たりの材料除去率と表面粗さの関係
(ステンレス鋼SUS304を加工する場合)

2-5 結 論

電解バフ複合加工の加工機構を解明するために、この加工法の基礎となっている電解加工とバフ研磨材加工の加工機構および加工性能についての考察と、これらを複合させた場合の加工機構および加工性能について概略的に考察した。以上をまとめると次のようになる。

- (1) 酸素酸塩型の電解液を用いた場合、電解液中の OH^- の放電により O_2 が生じるので、抵抗分極が生じやすい。抵抗分極が生じると、陽極に不働態化膜が生成されるので、陽極溶出が抑制される。
- (2) 酸素酸塩型の電解液を用いた場合、陽極が不働態化して溶出が抑制されるので、材料除去率 w は電気分解に関するファラデーの法則に基づいて計算された値よりかなり小さくなる。表面粗さは不働態化域においては前加工面のままでほとんど変化しない。過不働態化域では陽極溶出が限られた所でのみ生じて不均一な凹凸面になり、表面粗さは前加工面のものよりわるくなる。
- (3) バフ研磨材の砥粒は剛性の小さい基材で保持されているので、加えられる荷重 F の増加につれて砥粒密度 m_s が増大する。しかし砥粒密度 m_s は同じ粒度の砥粒をもつ研削砥石に比べて約5桁小さい。
- (4) バフ研磨材でステンレス鋼SUS316を加工した場合に得られる単位面積当たりの材料除去率 W_1 は $0.14[\text{mg}/\text{min}\cdot\text{cm}^2]$ 程度である。この値は工具としての構造がバフ研磨材に近い、ベルト研削用の研磨布紙のものに比べて約1/4000ときわめて小さい。これはバフ研磨材の砥粒のくい込み量 h_d が $0.01\sim 1[\mu\text{m}]$ ときわめて小さいため、得られる表面粗さは他の砥粒加工法の場合に比べて良くなる。
- (5) 電解加工とバフ研磨材加工を複合した場合、砥粒の擦過間隔と不働態化膜の生成に要する時間の大小関係により、2種の除去機構が存在する。電解作用による不働態化膜の生成と砥粒の擦過作用による不働態化膜の除去が繰り返し生じるためには、砥粒の擦過間隔 t_s は不働態化膜の生成に要する時間より長くなければならない。
- (6) 電解バフ複合加工で得られる単位体積当りの材料除去率 W_2 は、バフ研磨材加工と電解加工をそれぞれ単独に用いた場合より大きくなり、表面粗さはバフ研磨材加工で得られる値と同等かそれ以上に良くなることが期待される。

第3章 電解バフ複合加工機構の解析(その1)

—不働態化膜の生成機構の解析—

3-1 緒 論

前章までに検討したように、電解バフ複合加工によって高精度高能率に鏡面を製作するためには、3ページで述べたその加工機構①～③を解明する必要がある。その第1ステップとして本章においては①不働態化膜の生成機構を定量的に解析することとした。

不働態化膜の過渡的な生成過程を調べる際に重要なことは、陽極の工作物の表面に不働態化膜が生成されているかどうかを確認する方法である。第2章の2-2-1で述べたように不働態化域においては、ギャップ電圧 V_g を印加して電解を行っても、電解液に浸漬された陽極と陰極には外観上何の変化もない。また、大部分の金属材料は不働態化しても表面の外観上の変化は非常に少ないために、不働態化膜の存在を直接確認するのは困難である。近年発達してきた各種の表面分析法を用いれば金属の表面に生成された薄膜を定量的に分析するのは容易であるが、このような分析法においては測定対象の試料を真空中に置く必要があるため、液体中の金属表面の分析に用いることはできない。

不働態化膜の存在を間接的に知る方法としては、金属表面の電気的な定数の変化を調べる方法がある。この方法は電気化学の分野の研究を行なう際に多用され、電極および電極間で生じる様々な現象を抵抗、静電容量などの定数の変化としてとらえるものである。工作物の表面に抵抗性の不働態化膜が生成される場合には、不働態化膜の生成に伴って電解ギャップの抵抗(以後、ギャップ抵抗 R_g という)が変化するはずである。ギャップ電圧 V_g が一定の場合にはギャップ抵抗 R_g が変化すると、電解電流 I が変化するので、電解電流 I の過渡的な変化を測定すれば、不働態化膜の生成過程を調べることができる。

そこで本章では、酸素酸塩型の電解液を用いて純Tiを電解する場合について、不働態化膜が生成されるのに伴う電解電流 I の変化を測定し、ギャップ抵抗 R_g の変化を解析することによって不働態化膜の生成機構の解明を試みることにした。

なお工作物として純Tiを用いた理由は、この材料が不働態化すると表面に色の変化が生じ、不働態化膜が生成されているのが肉眼で容易に確認できることと、陽極溶出が生じる分解電圧 V_0 が高いので不働態化域のギャップ電圧 V_g の範囲が広いという特徴が

あるためである。

本章の構成は次のようになっている。3-2節では電解反応の実験装置と方法を述べ、3-3節では得られた実験結果に基づいて不働態化膜の生成機構について考察する。3-4節は以上をまとめた結論である。

3-2 実験装置と方法

3-2-1 実験装置

電解反応を調べるために用いた実験装置の概略を図3-1に示す。装置は加工槽を有する実験装置本体、電解液を加工槽に供給・回収する電解液ユニット、直流電源から構成されている。相對運動を与える機構としてNCフライス盤を用い、そのテーブル上にアクリル樹脂製の加工槽を設置する。加工槽内にNCフライス盤の本体とは電氣的に絶縁された加工テーブルを固定して、この加工テーブル上に工作物を取付ける。主軸に図3-2に示すロータリージョイント構造をもつ給電・給液機構を取り付け、主軸の回転を複合工具電極（直径70[mm]のステンレス鋼SUS304製）に伝えるとともに、電氣的な導通性を保ち、電解液を供給できるようにしている。

なお複合工具電極が回転する場合、その下面（工作物と対向する面）の面ブレ（図3-2の Δl_g ）は0.01[mm]程度である。工作物を加工する際、電解ギャップ l_g （この場合、複合工具電極の下面から工作物表面までの距離をいう）は3~5[mm]に設定するので、面ブレによる電解ギャップ l_g の変動は0.2~0.3%である。

電解液は複合工具電極の貫通穴から噴出し、主軸が回転すると、電極下面では図3-3に示すような電解液の流れが生じる。電気化学では、このような工具電極を特に回転円盤電極といい、反応生成物が系外に排出されやすいので、電極反応の測定手段としてよく用いられている²¹⁾。

電解液は電解液ユニットの貯蔵タンクからポンプで圧送して複合工具電極に供給する。使用済みの電解液は加工槽のドレンから貯蔵タンクに回収される。なお、電解反応で生じる反応生成物はフィルタFLTでろ過する。電解用の電源には直流定電圧電源装置（以後、直流電源という）を用い、一極は複合工具電極に、+極は加工テーブルに接続する。この電源装置は外部の信号で出力を制御することができ、パルス信号を加えた場

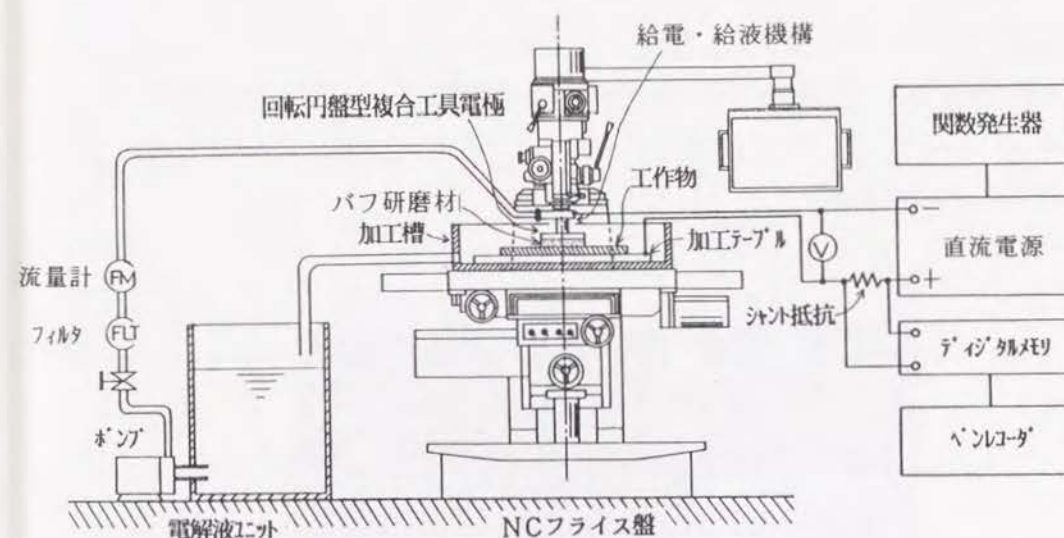


図3-1 電解反応を調べる実験装置の概略

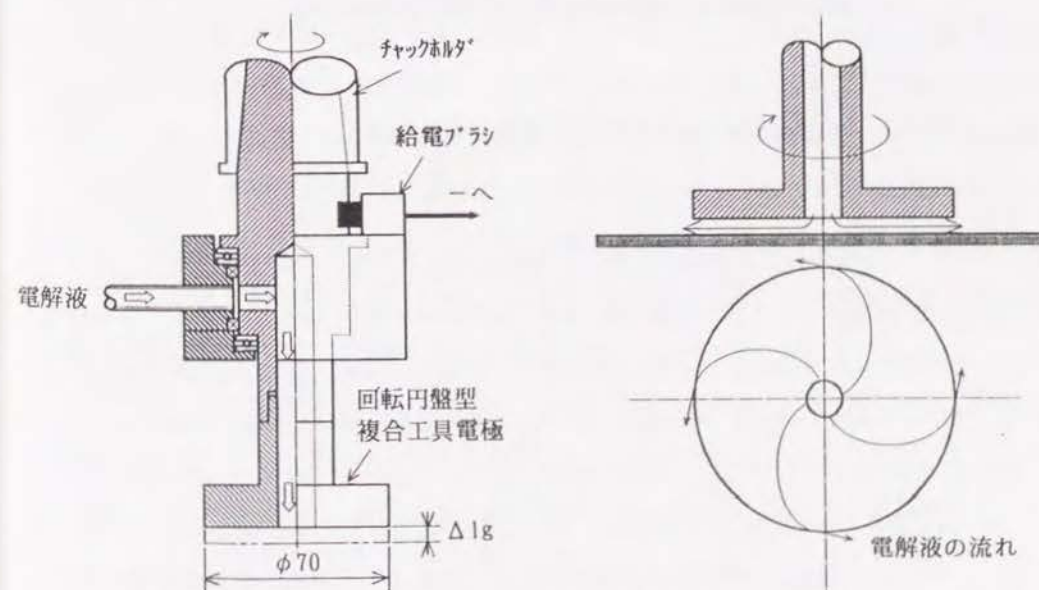


図3-2 給電・給液機構の構造

図3-3 回転円盤電極によって生じる電解液の流れ

合の出力電圧の立ち上がり速度は、図3-4に示すように約40 [V/ms]である。

電解電流 I は直流電源に直列接続したシャント抵抗 R_s の両端電圧 V_s を測定して求める。電圧を印加した直後には、電解電流 I は過渡的に変化する（以後、過渡電流という）ので、シャント抵抗 R_s の両端電圧 V_s はデジタルメモリで記憶した後、再生させてペンレコーダで記録する。

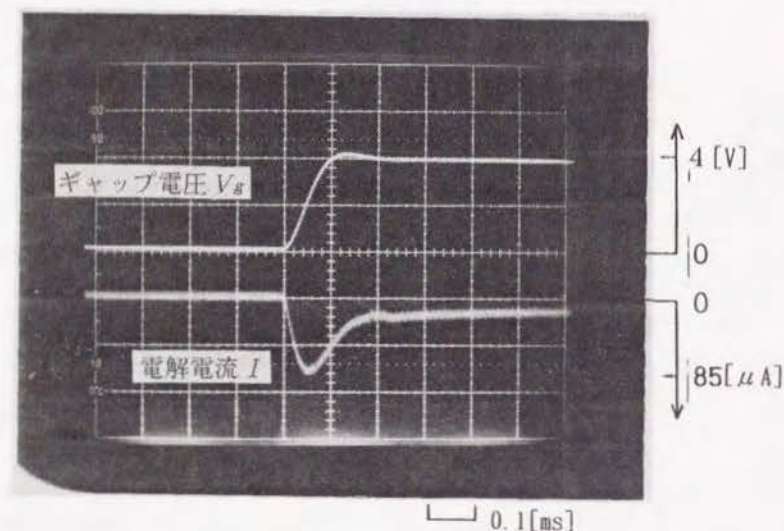


図3-4 電源電圧の立ち上がり特性

ギャップ電圧 V_g は複合工具電極と工作物の間に接続した可動コイル型の直流電圧計で測定する。工作物としてJIS 2種の純Ti板（200^{mm}×100^{mm}×1^{mm}）を用いる。工作物の表面には、電解電流 I を測定する際に漏れ電流の影響を少なくして測定精度を高めるために、複合工具電極と対向する部分が円形になるように絶縁テープを貼り付ける。このような構造にすることによって工作物が複合工具電極と対向する面積（工作物面積 A_e ）を自由に変えられる。ただし面積 A_e を 1×10^{-2} [cm²] 以下にする場合には、工作物としてTiのワイヤを用い、図3-5に示すように、ワイヤをエポキシ樹脂で充填して、周囲との電気的な絶縁性を保った上で通電する。

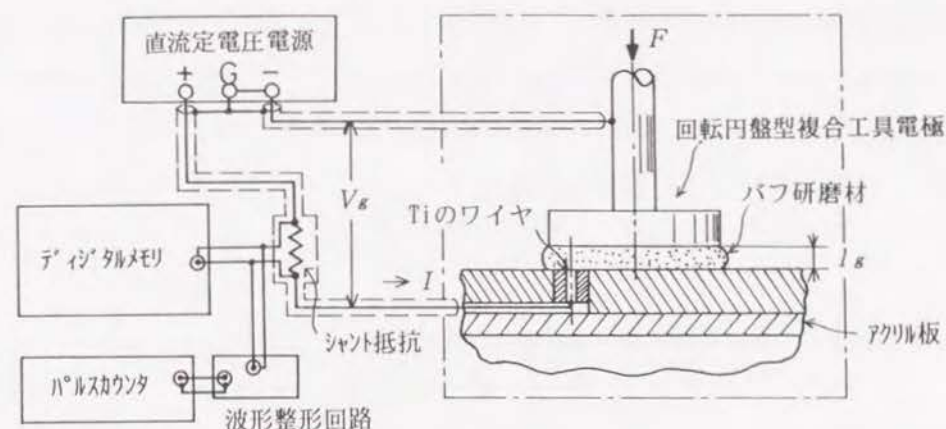


図3-5 Tiのワイヤを工作物として用いて電解電流を測定する方法

3-2-2 実験方法

電圧を印加した直後に流れる過渡電流を測定した後で、電解電流 I がほぼ一定となる状態において、ギャップ電圧 V_g と電解液の種類の違いが電解反応に与える影響を調べる。通電後の工作物の表面の色と性状を観察し、工作物の材料除去率 w は通電前後の工作物の重量差を精密天秤で測定した値と加工時間 t から求める。なお、電解液としてハロゲン元素（不動態化を抑制する作用がある）の有無による電解反応の違いを比較するために、酸素酸塩型の NaNO_3 水溶液と活性化型の NaCl 水溶液の2種類のものを用いる。

通電して工作物の表面に色の変化がみられる場合には、不動態化膜が生成されていることを確認するために表面分析を行う。分析は表面の硬度をマイクロビッカース硬度計で測定し、化学的な組成、膜厚の評価は光電子分光分析装置、オージェ電子分光分析装置の分析原理の異なる2種類のものを用いて行う。

光電子分光分析法は、真空中で試料の表面にX線を照射して、試料から放出される光電子を捕捉し、光電子のエネルギーをスペクトル分析することにより、試料を構成する元素の同定を行う方法である。オージェ電子分光分析法は、真空中で試料面に電子ビームを照射して、放出されるオージェ電子を捕捉し、そのスペクトルから元素の分析を行う方法である²²⁾。この方法は、電子ビームを試料に照射するために、前述の光電子分光分析法に比べて、深さ方向の分析精度がより高いという特徴がある。

不動態化膜が生成される過程を調べるために、過渡電流の計測実験を行う。電圧を印

加した直後の過渡電流の変化をデジタルメモリで測定し、電流波形から後述する投入電気量 q を求める。実験によりギャップ電圧 V_g 、およびその波形、工作物面積 A_e および通電開始からの投入電気量 q が電流変化に与える影響について調べる。なお電解電流 I は式 (3-1) で求める。

$$I = \frac{V_g}{R_s} \quad (3-1)$$

通電開始からの投入電気量 q は電流波形を数値積分して求める。

3-3 実験結果と考察

3-3-1 工作物の不働態化と溶出

複合工具電極の下面を工作物の上面に対向させた状態で、直流電源からステップ状のギャップ電圧 V_g を印加すると、電解電流 I は図3-6に示すように変化した。電解電流 I は電圧を印加した直後に最大となるが、その後急激に減少し、ある一定の時間が経過するとほぼ一定値になった。

電解電流を表すパラメータとして、電流の最大値を I_p (以後、最大電流という)、電圧を印加した時点から電流がほぼ一定になるまでに要する時間を t_s 、その時の電流値を I_s (以後、定常電流という) とする。最大電流 I_p 、定常電流 I_s は電解条件の影響を受けて変化する。工作物の面積 A_e が一定の場合には、最大電流 I_p 、定常電流 I_s はギャップ電圧 V_g の増加とともに増大し、電流が一定になるまでに要する時間 t_s が長くなる。

また、ギャップ電圧 V_g が一定の場合には、工作物の面積 A_e が増加するにつれて最大電流 I_p 、定常電流 I_s が増大し、時間 t_s が長くなる。このような電解電流 I の変化を電解反応と対比させて考えるために、電流が急激に減少する領域を過渡領域、電流がほぼ一定となる領域を定常領域として区別する (図3-6参照)。

酸素酸塩型の NaNO_3 水溶液を用いた場合について、定常領域において測定されたギャップ電圧 V_g と定常電流 I_s の関係を図3-7に示す。ギャップ電圧 V_g が約20[V]までは、電圧の増加に対する定常電流 I_s の増加割合は小さいが、20[V]を越えると定常電流 I_s の増加割合は大きくなり、25[V]前後から定常電流 I_s は急激に増大し、30[V]以上ではほぼ一定の割合で増大した。通電中の電解反応は、ギャップ電圧 V_g の値によって異な

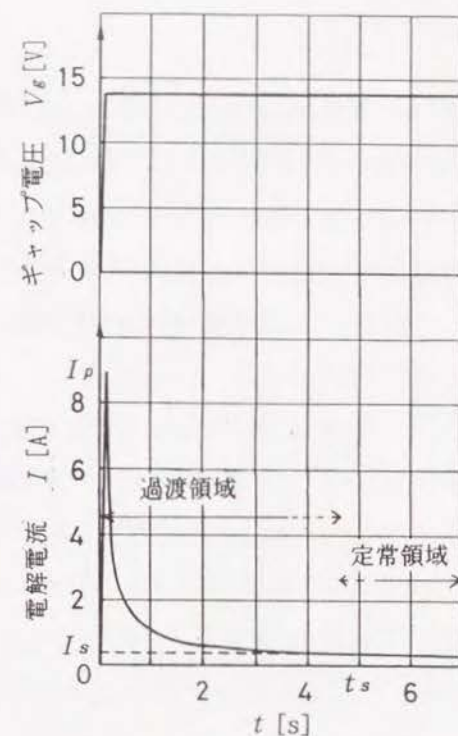


図3-6 ステップ状のギャップ電圧を印加した場合の電解電流の時間変化 (JIS2種純Ti, $A_e=28.8[\text{cm}^2]$, 1%aq. NaNO_3 , $I_g=3[\text{mm}]$)

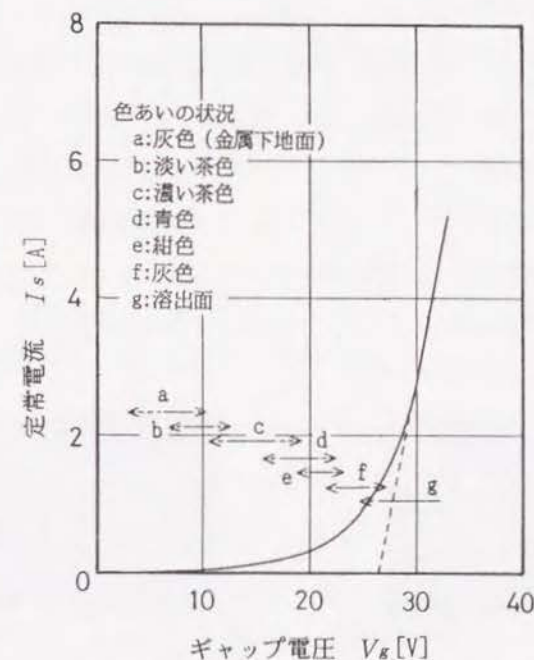


図3-7 Tiを電解した場合のギャップ電圧と定常電流の関係 (JIS2種純Ti, $A_e=28.8[\text{cm}^2]$, 1%aq. NaNO_3 , $I_g=3[\text{mm}]$)

り、20[V]以下では電解に伴う気泡の発生等は生じなかった。ギャップ電圧 V_g が20[V]以上になると、電解ギャップから噴出する電解液に濁りが見られた。濁りは電流値が急激に増大する約25[V]のギャップ電圧 V_g を越えてから急に著しくなり、電解反応が活発になっていることが分かった。この結果から、濃度1%の NaNO_3 水溶液でTiを電解する場合の分解電圧 V_o は、図3-7において定常電流 I_s が急激に増加する約25[V]であることが分かった。

電解液が濁る原因の一つとして、陰極、陽極において、電解反応によってガスが発生することが考えられる。陰極では式(2-4)の反応による H_2 が、陽極では式(2-8)による O_2 が生じ、これらのガスは電解液中に気泡として混入する。また濁りの原因としては、後述する陽極溶出によって電解生成物が生じることも考えられる。電解液の流速が0の場合、気泡や電解生成物が介在すると電解液の抵抗 R_e が増大するために電解電流 I は減少する。しかしある程度液の流れがあると、これらの介在物は生成しても電解ギャップから排出されるので、電解液の抵抗 R_e を著しく増加させることはない(流速が0の場合の電解電流 I は流速が0でない場合に比べて約20%減少する)。

通電前の工作物の表面はTiの素地を示す銀灰色を呈しているが、通電後には色が変わった。色は、図3-7に示すようにギャップ電圧 V_g によって変わり、約15[V]までは茶色を基調とした色になり、15~25[V]の範囲では青を基調とした色になり、ギャップ電圧 V_g が高くなるほど色が濃くなった。なお、色は電圧を印加した時間 t には依存せず、ギャップ電圧 V_g が一定の場合には時間 t の大小にかかわらず同じ色の面が得られた。ギャップ電圧 V_g を25[V]以上にすると、通電後の工作物の表面には図3-8に示すように、局部的に溶出痕が形成され、溶出痕はギャップ電圧 V_g が増加するにつれて工作物の表面に占める割合が増した。



(a) 倍率50倍でみた場合



(b) 倍率500倍でみた場合

図3-8 陽極溶出により溶出痕が形成された工作物の表面

そこでギャップ電圧 V_g と材料除去率 w の関係を調べると図3-9のようになり、陽極溶出は25[V]以上の電圧で生じた。図3-7、図3-9から陽極溶出は電解電流 I の増加に伴って増大することが分かった。このように酸素酸塩型の電解液を用いた場合、電解反応はギャップ電圧 V_g が分解電圧 V_o を越えると急に活発になるのが特徴で、Au、Agなどの貴金属を除いたほとんどの金属について、式(2-8)により陽極で生じた O_2 で酸化されて抵抗分極が生じるので、同様の現象が現れる。

不動態化域、過不動態化域は2-2-1で述べたように、おおむね分解電圧 V_o を境として分けられる。濃度1%の NaNO_3 水溶液でTiを陽極とする場合、不動態化域は図3-7から分かるようにギャップ電圧 V_g が25[V]以下の領域に、過不動態化域は25[V]以上の領域にある。

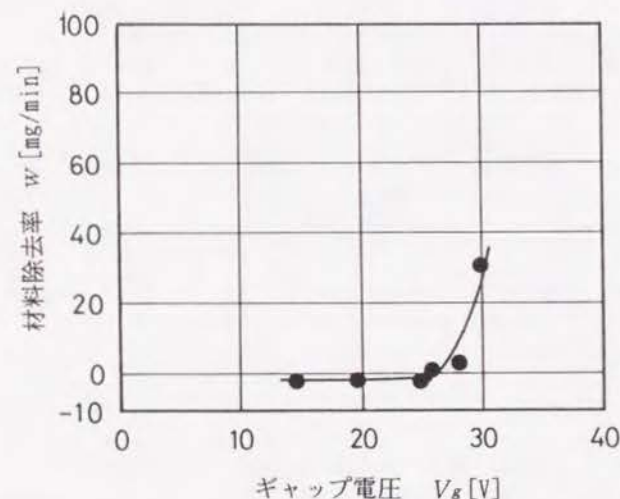


図3-9 Tiを電解した場合のギャップ電圧と材料除去率の関係
(JIS2種純Ti, $A_e=28.8[\text{cm}^2]$, 1%aq. NaNO_3 , $I_g=3[\text{mm}]$, $t=30[\text{s}]$)

次に活性化型の電解液を用いた場合の電解反応について考察する。活性化型の電解液とは、イオン化によって他の元素を酸化する性質の強い元素からなる電解質水溶液、例えば NaCl 水溶液をいう。濃度1%の NaCl 水溶液を電解液として用いた場合について測定したギャップ電圧 V_g と定常電流 I_s の関係を図3-10に示す。比較のために前述の濃度1%の NaNO_3 水溶液を用いた場合のデータを図中に併記している。工作物としてTiを用いると、活性化型の電解液でも酸素酸塩型の場合と同様に、定常電流 I_s は特定のギャップ電圧 V_g の値から急に増大し、分解電圧 V_o は約15[V]になった。電解反応は分解電

圧 V_0 を境として変わり、ギャップ電圧 V_g が分解電圧 V_0 より低い領域では、通電後の工作物表面は淡い茶色に変色した。分解電圧 V_0 より高い電圧では、通電中激しく気泡が生じ、通電後の工作物の表面は灰色の梨地面になった。これは陽極溶出が生じたことを示している。

この結果から、不動態化が生じにくいといわれる活性化型の電解液でも、TiはClに冒されにくいため不動態化することが分かった¹²⁾。

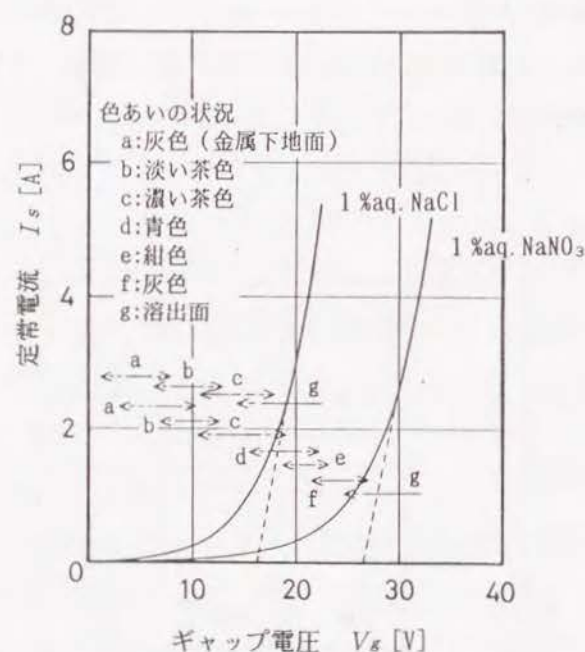


図3-10 Tiを電解した場合のギャップ電圧と定常電流の関係の比較
(JIS2種純Ti, $A_e=28.8[\text{cm}^2]$, 1%aq. NaNO_3 , 1%aq. NaCl , $l_g=3[\text{mm}]$)

3-3-2 不動態化膜の測定

(1) 構成元素の測定

電解で工作物の表面に色がつくのは不動態化膜が生成されたことによると考えられるので、生じた不動態化膜と金属素地との密着性、化学的な性質を調べた。通電終了後の工作物は表面の汚れを除去するために、水洗いの後、アセトンで脱脂を行なっている。この作業では洗浄効果を高めるために工作物の表面を脱脂綿で擦っているが、表面に生成された膜が金属の素地との密着性が弱い場合には、この作業によって膜が部分的に剝離することがある。しかし本実験の場合は電解後の工作物は、洗浄作業で色が落ちるよ

うなことはなかった。また工作物を折り曲げても、塗膜のようにひび割れするようなこともなかったので、不動態化膜は金属の素地にきわめて強く密着していることが分かった。

このような性質を有する不動態化膜が表面に生成されると、表面の機械的性質が変化することが多いので、マイクロピッカース硬度計で表面の硬さを測定した。測定された通電時のギャップ電圧 V_g と表面のピッカース硬さ H_v の関係を図3-11に示す。ギャップ電圧 V_g が0[V]の場合のピッカース硬さ H_v は、金属Tiの硬さに相当する $H_v=180$ 前後となっている。ギャップ電圧 V_g が増大して表面の色が濃くなると、ピッカース硬さ H_v は増大し、色の濃さと表面の硬さの間には何らかの関連があることが分かった。

図3-12は、電解で淡い茶色になった工作物の表面を光電子分光分析装置により測定した結果で、TiとOのスペクトルの分布を表している。測定の方法は、工作物の表面からバルク層にかけての情報を得るために、工作物の表面にArガスを高電圧で電離させて得たArイオンを照射することによって微量除去するプロセス（以後、イオンビーム照射という）と、光電子のスペクトル分析を行うプロセスを交互に繰り返して行った。

図3-12においてイオンビーム照射する前のスペクトルは、Oの化合物の存在を示す530[eV]のOのピークが強く現れているが、Tiのスペクトルには際だったピークは認められない。また図中には示していないが、イオンビーム照射する前のスペクトルにはCのスペクトルに強いピークが検出された。この結果から、イオンビーム照射する前の工作物の表面は、有機化合物からなる汚染層で覆われていることが分かる。

イオンビーム照射を5[min]行った後のスペクトルは、Tiの化合物の存在を示す458[eV]のピークが顕著に現れているが、Oのスペクトルはイオンビーム照射する前のものとほとんど変わらない。さらに15[min]イオンビーム照射を行うと、Tiのスペクトルに金属Tiの存在を示す454[eV]、460[eV]の二つの顕著なピークが現れるようになり、逆にOのスペクトルは531[eV]にピークがシフトするとともにその強度が小さくなっている。このようなOのスペクトル強度の減少、これとは逆のTiのスペクトル強度の増大は、イオンビーム照射によって表面層が除去されて、Tiの素地が露出するにつれてより顕著になった。

以上より、電解で色がついた工作物の表面は三層から構成されていることが分かった。すなわち、第1層は汚染層で、第2層は5分間イオンビーム照射を行った後のスペクトルに見られる層で、この層のスペクトルは汚染層、バルク層のものとは異なっているの

で、TiとOの化合物からなる不動態化膜に相当する部分であると思われる。第3層は15 [min]イオンビーム照射を行った後のスペクトルに見られる層でTiのバルク層である。

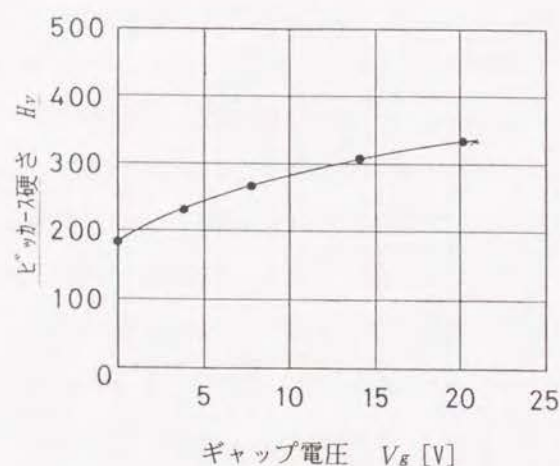


図3-11 ギャップ電圧と表面の硬さの関係
(JIS2種純Ti, 圧子荷重 10[gf]にて測定)

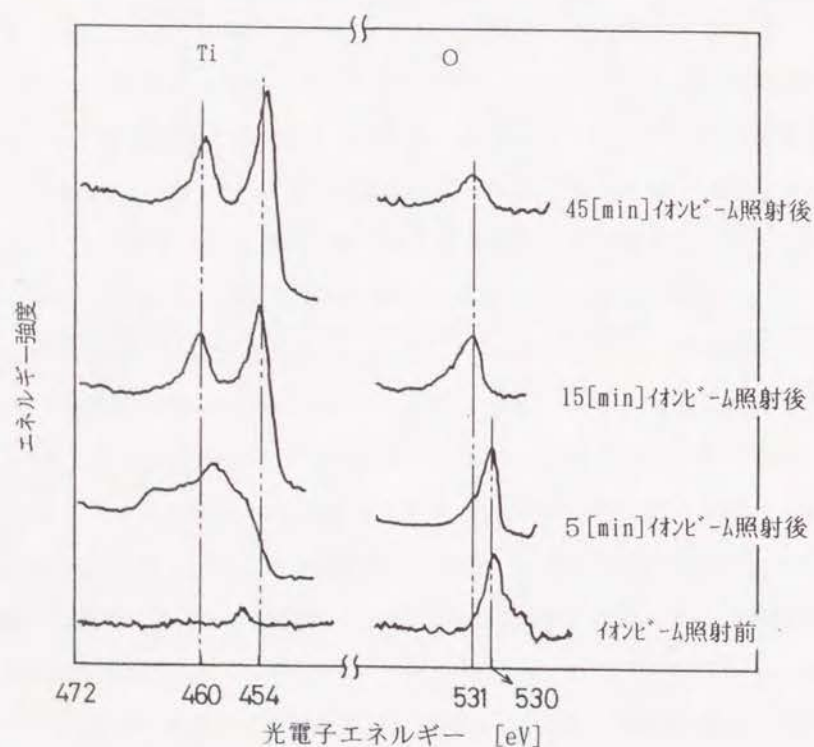


図3-12 電解加工されたJIS2種純Ti表面のTiとOのスペクトルの変化

(2) 膜厚の測定

電解で色がついた工作物の表面をイオンビーム照射しながら、Ti、O、Cのオージェ電子スペクトルを測定した結果を図3-13に示す。同図(a)は淡い茶色の面、同図(b)は濃い茶色の面について測定した結果である。グラフの横軸はArイオンの照射時間 t_E [min]、照射深さ d_E [nm]を表す。ただしTiの不動態化膜がArイオンの照射を受けた場合に、単位時間当たりどの程度除去されるかが不明なので、照射深さ d_E [nm]は同一条件でSiO₂にArイオンを照射した場合の参考値を示した。

図3-13においてイオンビーム照射を開始した直後には、Cの強度が減少し、TiとOの強度は逆に増加した。これは前述の光電子分光分析法による元素の測定結果からも明らかのように、工作物の表面に汚染層が形成されていることによるもので、その厚さは面の色の濃さとは関係なく、約20[nm]であることが分かった。Oの強度は表面から約20[nm]で最大になるが、それ以後は減少し、淡い茶色の面の場合には約120[nm]で、濃い茶色の面の場合には約200[nm]で検出限界になった。これとは逆にTiの強度は約20[nm]から増加する傾向がより強まり、Oの強度が検出限界になる深さでほぼ一定値になり、イオンビーム照射がTiのバルク層に達していることが分かる。

この分析結果から、電解で色がついた工作物の表面には汚染層とバルク層の間に、TiとOの化合物からなる不動態化膜が生成されていることは明らかである。不動態化膜の膜厚 h_m は色によって変わり、淡い茶色の面では約120[nm]、濃い茶色の面では約200[nm]と色の濃いものほど厚い不動態化膜が生成される。

そこで色の濃さと不動態化膜の膜厚の関係を、薄膜による光の干渉と屈折に基づいて考察することとした。図3-14は不動態化膜が生成された工作物の表面に、光が入射する場合の光の干渉機構を模式的に表したものである。この際工作物の表面に生成される汚染層は膜厚が薄く、光学的性質には影響を及ぼさないとして無視している。不動態化膜に光が入射すると、表面、不動態化膜と金属の素地との境界面では光の反射、干渉が生じる。不動態化膜の膜厚を h_m [μm]、光の屈折角を θ_n [deg]、不動態化膜の屈折率を n_m 、光の波長を λ_0 [μm]とすると、単層膜の光の反射、屈折の法則により

$$n_m \cdot h_m \cdot \cos \theta_n = \frac{m \cdot \lambda_0}{4} \quad (3-2)$$

の関係が成立する²³⁾。ここに m は正の整数である。単色光の場合には、不動態化膜表面

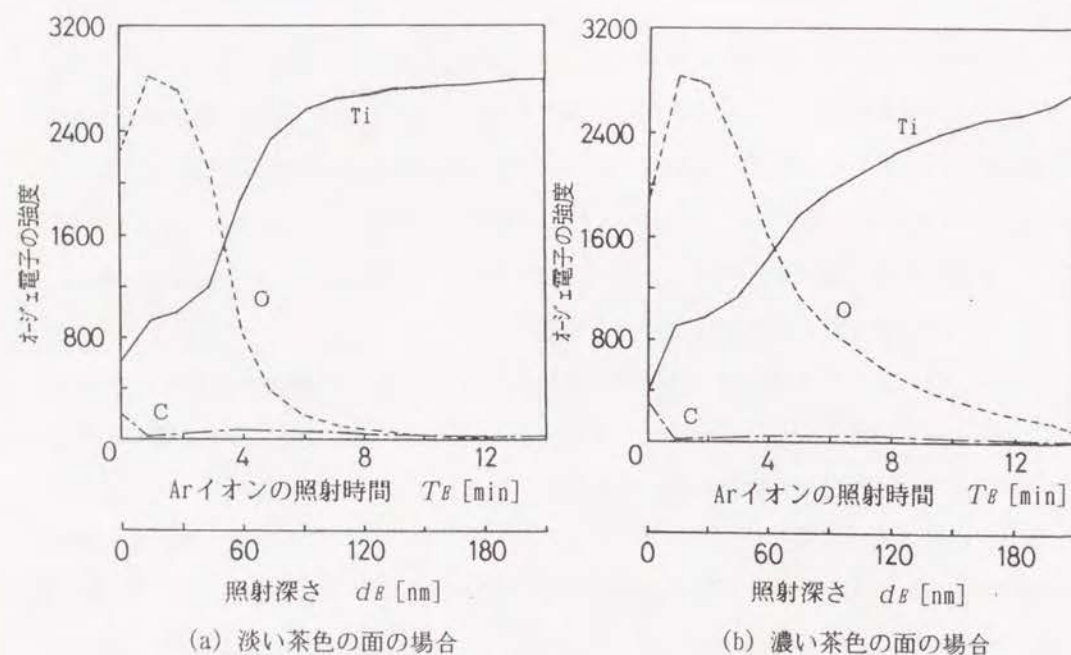


図3-13 電解加工されたJIS2種純Ti表面の深さ方向の元素分析

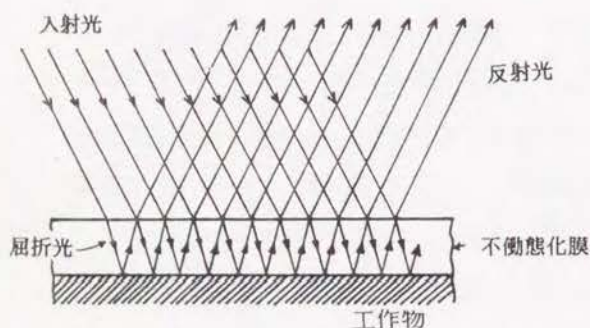


図3-14 薄膜による光の干渉機構

表3-1 薄膜の膜厚と屈折率の積と表面の色の関係

$h_w \cdot n_w$ [μm]	表面の色
~ 0.1	灰赤
0.110	黄赤
0.120	黄みの薄赤
0.126	紫みの薄赤
0.128	赤紫
0.130	赤みの紫
0.134	紫
0.138	青みの紫
0.150	紫みの青
0.180	青
0.260	灰
0.320	緑みの黄
0.340	黄赤

の反射光と内部からの屈折光が干渉して、表面に干渉縞を生じる。干渉縞は m が奇数のとき明るくなり、偶数のときは暗くなる。

白色光の場合には光の波長 λ_0 が連続的に変化するので複雑である。久保田は薄膜に太陽光が入射する場合の表面の色を色彩論の立場から考え、C.I.A表色系に従う薄膜の三色係数を導いた²⁴⁾。C.I.A表色系とは人間の視感度の基準を定めたもので、色の感じ方は三色係数によって定量的に表される。それによると薄膜の色は表3-1に示すように膜厚 h_w と屈折率 n_w の積に比例して周期的に変化し、 $h_w \cdot n_w$ が大きくなるほど色が濃くなる²⁵⁾。

電解で生成された不働態化膜の屈折率 n_w がギャップ電圧 V_g によって変化しないと仮定すると、不働態化膜の膜厚 h_w が大きくなるにつれて色が濃くなるのはこのような現象によると思われる。

3-3-3 電解ギャップの等価回路

(1) 電解液の抵抗と不働態化膜の抵抗

電気化学では、電極の表面で生じる現象を解析するために、電解ギャップの等価回路を仮定して、回路定数を解析することにより、現象を間接的に調べることが多い。この方法に従ってまず電解ギャップの等価回路とその回路定数について考察する。

一般に電解ギャップの等価回路は、電解液のインピーダンス Z_e [Ω]、電極の分極インピーダンス Z_p [Ω] の直列回路として扱われる²⁶⁻²⁷⁾。電解液のインピーダンス Z_e は電解液の濃度が比較的高い場合には、ほぼ電解液の抵抗 R_e [Ω] のみで構成される。また陽極に不働態化膜が生成される場合、電極の分極インピーダンス Z_p は不働態化膜の抵抗 R_p [Ω] と不働態化膜の静電容量 C_p [F] の並列回路として扱えるので、電解ギャップの等価回路は図3-15のように表すことができる。

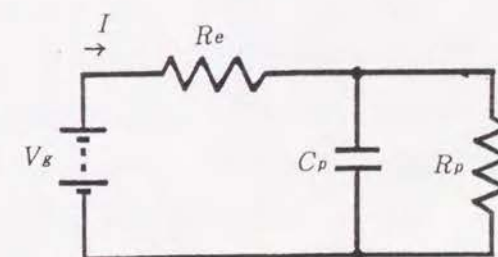


図3-15 電解ギャップの等価回路

図3-15の等価回路において、回路の定数を一定と仮定すると、等価回路に電圧 V_g [V] のステップ状のギャップ電圧を印加した場合の t [s] 後の電解電流 I [A] は、過渡

電流の解析から

$$I = \frac{V_g}{R_e} - \frac{V_g \cdot R_p}{R_e \cdot (R_e + R_p)} \cdot \left\{ 1 - \exp \left(\frac{-(R_e + R_p)}{C_p \cdot R_e \cdot R_p} \cdot t \right) \right\} \quad (3-3)$$

で表される²⁶⁾。式(3-3)から電解電流 I は、ギャップ電圧 V_g を印加した直後に最大になり、その後時間 t の経過につれて減少し、一定の値になることが分かる。ギャップ電圧 V_g を印加した直後に流れる最大電流 I_p の値は、式(3-3)において時間 t を0とおくと

$$I_p = \frac{V_g}{R_e} \quad (3-4)$$

となり、最大電流 I_p はギャップ電圧 V_g と電解液の抵抗 R_e のみによって決まる。

図3-16はステップ状のギャップ電圧 V_g を印加した場合に流れる最大電流 I_p の測定結果を示す。図中の直線は、電解液の抵抗 R_e の推定値とギャップ電圧 V_g の値を式(3-4)に代入して求めた計算値である。なお電解液の抵抗 R_e は、面積 A_e [cm²] の陽極、陰極間に、抵抗率 ρ_e [Ω・cm] で長さ l_g [cm] の抵抗体があるものと仮定して次の式(3-5)により求めた。

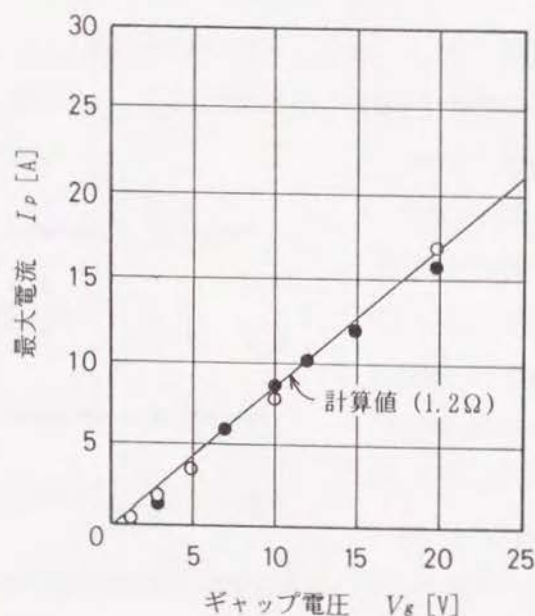


図3-16 ステップ状のギャップ電圧を印加した場合の
ギャップ電圧と最大電流の関係
(JIS2種純Ti, $A_e=28.8$ [cm²], 1%aq. NaNO₃, $l_g=3$ [mm])
(● 1%aq. NaNO₃, ○ 1%aq. NaCl)

$$R_e = \rho_e \cdot \frac{l_g}{A_e} \quad (3-5)$$

ここで抵抗率 ρ_e の値は交流電圧を印加する方式の導電率測定器によって測定した。イオン交換水のように液中の電解質がきわめて少ない場合、抵抗率 ρ_e は $50 \sim 1,000 \times 10^4$ [Ω・cm] と高い値になり、後述するように不働態化膜が生成する際のギャップ抵抗 R_g を解析する際に、電解液の抵抗 R_e を無視できなくなる。しかし濃度1%のNaNO₃水溶液とNaCl水溶液の抵抗率 ρ_e はいずれも約300 [Ω・cm] と小さいので、ギャップ抵抗 R_g は不働態化膜の抵抗 R_p で近似できる。図3-16においてギャップ電圧 V_g と最大電流 I_p の測定結果は用いた電解液の種類に関係なく、計算値とよく一致している。

この結果を等価回路と対比して考えると、ギャップ電圧 V_g を印加した直後において工作物の表面に不働態化膜は生成されてなく、電解ギャップには電解液の抵抗 R_e のみしか存在しないことが分かる。

一方、定常電流 I_s を求めるために、式(3-3)において時間 t が無限に経過した場合を考えて $t=\infty$ とすると、定常電流 I_s [A] は

$$I_s = \frac{V_g}{R_e + R_p} \quad (3-6)$$

となる。式(3-6)から、定常電流 I_s が流れている状態ではギャップ抵抗 R_g は電解液の抵抗 R_e 、不働態化膜の抵抗 R_p の和

$$R_g = R_p + R_e \quad (3-7)$$

となり、不働態化膜の抵抗 R_p が定常電流 I_s に影響を与えることが分かる。

ギャップ抵抗 R_g が一定の場合には、定常電流 I_s はギャップ電圧 V_g の増加に対して直線的に増大する。しかし3-3-1で考察したように、不働態化域と過不働態化域では、ギャップ電圧 V_g の増加に対する定常電流 I_s の増加の割合が異なっている。

図3-17はギャップ電圧の変化分 ΔV_g [V] と定常電流の変化分 ΔI_s の関係を不働態化域、過不働態化域について示したもので、直線の傾斜の逆数からギャップ抵抗 R_g を求めることができる。図3-17から過不働態化域のギャップ抵抗 R_g は約1.5 [Ω] となり、電解液の抵抗 R_e の値1.2 [Ω] とほぼ等しい。しかし不働態化域のギャップ抵抗 R_g は、不働態化膜の抵抗 R_p が回路に構成されるために、抵抗値が約2500 [Ω] と大きくなった。

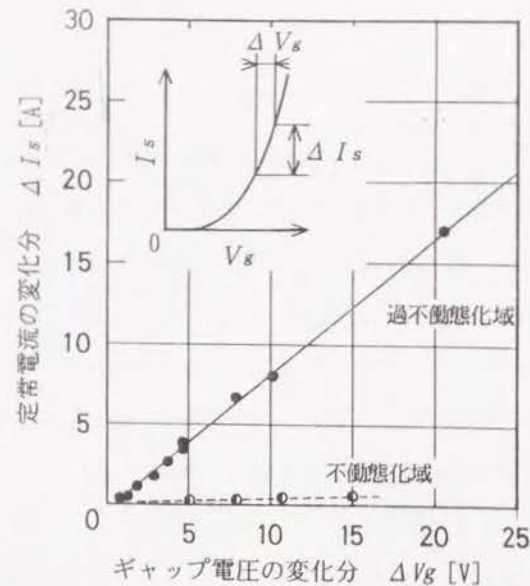


図3-17 ギャップ電圧の変化分と定常電流の変化分の関係
(JIS2種純Ti, $A_e=28.8[\text{cm}^2]$, 1%aq. NaNO_3 , $l_g=3[\text{mm}]$)

(2) 不働態化膜の静電容量

不働態化膜の静電容量 C_p [F] は、回路の時定数 τ に影響をおよぼし、その値が大きいほど電流値が一定になるまでに要する時間が長くなる。図3-15の等価回路の時定数 τ [s] は

$$\tau = \frac{C_p \cdot R_e \cdot R_p}{R_e + R_p} \quad (3-8)$$

となる。不働態化膜の静電容量 C_p の値を調べるために、通電後の工作物の表面にAlの薄膜を真空蒸着し、表面の静電容量をLCRメータで測定したところ、表面積約 $0.3 \times 10^{-3} [\text{cm}^2]$ について数10～数100[pF]となった。そこで電解液抵抗を $R_e=3.7[\text{k}\Omega]$ 、不働態化膜の抵抗を $R_p=50[\text{k}\Omega]$ として式(3-8)を用いて時定数 τ を計算すると、時定数は $\tau=0.03 \sim 0.3[\mu\text{s}]$ となる。

波高値が10[V]、衝撃係数が0.5、継続時間0.5[ms]、休止時間0.5[ms]のパルス列を印加した場合の電解電流 I を測定した結果を図3-18に示す。電解電流 I は立上り時の最大値の時点から時間約1[μs]にかけて、不働態化膜の静電容量 C_p の充電によるものと

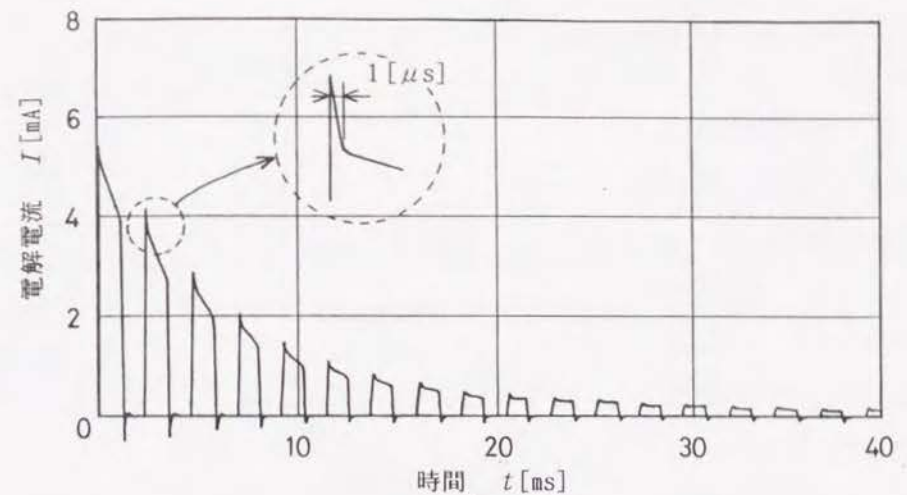


図3-18 パルス電圧を印加した場合の電解電流の過渡的变化
(JIS2種純Ti, $A_e=3 \times 10^{-4} [\text{cm}^2]$, 1%aq. NaNO_3 , $l_g=3[\text{mm}]$, $V_g=10[\text{V}]$)

思われる急激な減少が生じた。電解電流 I はその後も減少するが、それは時定数が数10[ms]程度の緩やかな減少で、先に求めた時定数 $\tau (=0.03 \sim 0.3[\mu\text{s}])$ とは大きく異なる。この減少は不働態化膜の静電容量 C_p の影響によるものとは考え難く、後述の3-3-4で述べるように不働態化膜の生成にともなってギャップ抵抗 R_g が増大する過程で生じたと思われる。

このことから不働態化膜の静電容量 C_p は、過渡電流の減少にはあまり影響を及ぼしていないことが分かる。なお静電容量の測定結果から推察すると、不働態化膜は単純な平板蓄電器を構成しており、その膜厚 h_w を図3-13から数100[nm]とすると比誘電率は2以下の小さい値になる。このように比誘電率の値がかなり小さいことから考えて、不働態化膜は非晶質の酸化Tiになっているものと思われる。

3-3-4 不働態化膜の生成機構についての考察

(1) 不働態化膜が生成される過程でのギャップ抵抗のモデル

不働態化膜がどのようにして生成されるのかについては従来からさまざまな説が提唱されているが、未だその機構は明らかではない^{10, 29-30)}。しかし3-3-2で不働態化膜の化学的な組成を分析した結果では、不働態化膜には工作物の金属元素自体が含まれているので、不働態化膜は陽極溶出した金属イオンが発生期のOで酸化状態になり、工

作物の表面に付着して生成するのではないかと考えられる。

工作物の材料除去率 w はファラデーの法則により、電極に投入された電気量 q に比例するので、不働態化膜が生成されることによるギャップ抵抗 R_g の増大も電気量 q に比例すると考えられる。そこで投入された電気量 q とギャップ抵抗 R_g の関係を解析することとした。

まず不働態化膜が工作物の表面を覆う過程について考える。工作物の表面は材料の結晶粒界、転位、凹凸があり、電流密度 J の分布は均一ではないので、発生期の O で酸化された金属イオンは工作物の表面に様に付着するとは考えにくい。Armstrongらは超硬合金の不働態化について、工作物の表面上に不働態化膜が生成される核ができ、核を中心として不働態化膜が2次的に成長すると考えた³¹⁾。

ただしこの考え方では、陽極溶出は金属イオンが不働態化膜を通過するために生じるという仮定をおいているので、不働態化膜ができた後も陽極溶出が続くことを前提にしている。Tiの場合は不働態化膜ができた後は陽極溶出は生じないので、この考え方をそのまま適用することはできない。

そこで図3-19に示すような不働態化膜の抵抗を考慮にいれ、かつ陽極溶出は不働態化膜が生成されていない部分でのみ生じるという、ギャップ抵抗 R_g のモデルを考える。

図3-19において直径 D_w [cm] の工作物と陰極が電解ギャップ l_g [cm] を隔てて対向し、両極の間には抵抗率 ρ_e [$\Omega \cdot \text{cm}$] の電解液が充滿されているとする。また不働態化膜の膜厚を h_w [cm]、抵抗率を ρ_w [$\Omega \cdot \text{cm}$] とし、膜厚 h_w は一定で、膜は中心 O から半径方向に投入された電気量 q に比例して広がるものと仮定する。また中心 O から膜の外縁端までの距離は r_w [cm] とする。

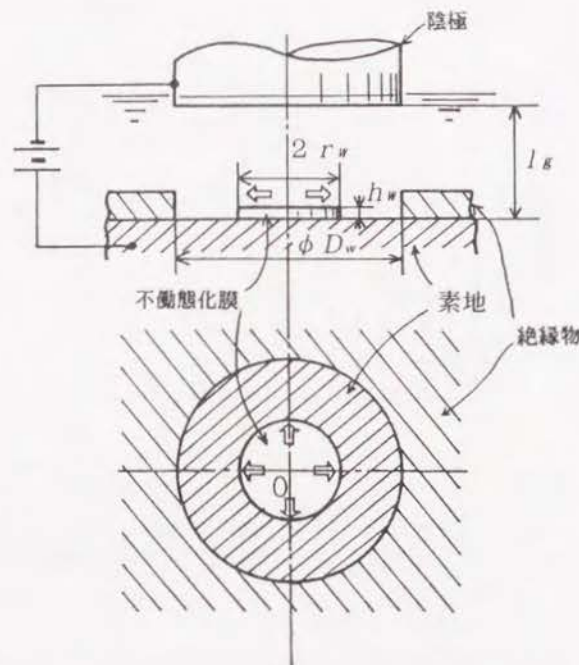


図3-19 ギャップ抵抗のモデル

ギャップ抵抗 R_g [Ω] は、不働態化膜が生成された領域の抵抗 R_{gw} [Ω] と生成されていない領域の抵抗 R_{ge} [Ω] の並列回路として

$$R_g = \frac{R_{ge} \cdot R_{gw}}{R_{ge} + R_{gw}} \quad (3-9)$$

で表すことができる。ここに不働態化膜が生成されていない領域の抵抗 R_{ge} は、不働態化膜の膜厚 h_w が電解ギャップ l_g に比べて無視できるほど小さいので、

$$R_{ge} = \rho_e \cdot \frac{l_g}{\pi \cdot \left(\frac{D_w^2}{4} - r_w^2 \right)} \quad (3-10)$$

となる。また不働態化膜が生成された領域の抵抗 R_{gw} は、不働態化膜の抵抗 R_p と電解液の抵抗 R_e の直列回路になるが、不働態化膜の抵抗 R_p は電解液の抵抗 R_e よりはるかに大きいので、

$$R_{gw} = \rho_w \cdot \frac{h_w}{\pi \cdot r_w^2} \quad (3-11)$$

で近似することができる。式(3-10)と式(3-11)を式(3-9)に代入すると

$$R_g = \frac{\rho_w \cdot h_w \cdot \rho_e \cdot l_g}{\pi \cdot \rho_w \cdot h_w \cdot \frac{D_w^2}{4} + (\rho_e \cdot l_g - \rho_w \cdot h_w) \cdot \pi \cdot r_w^2} \quad (3-12)$$

となる。

次にギャップ抵抗 R_g と投入された電気量 q の関係は、生成された不働態化膜の面積が投入電気量 q [C] に比例して増加するので、

$$\pi \cdot r_w^2 = k \cdot q \quad (3-13)$$

となる。ここに k [cm^2/C] は、単位電気量あたりに生成される不働態化膜の面積を表す比例定数である。式(3-13)を式(3-12)に代入すると、投入電気量 q とギャップ抵抗 R_g の関係を表す次の式(3-14)が得られる。

$$R_g = \frac{\rho_w \cdot h_w \cdot \rho_e \cdot l_g}{\pi \cdot \rho_w \cdot h_w \cdot \frac{D_w^2}{4} + (\rho_e \cdot l_g - \rho_w \cdot h_w) \cdot k \cdot q} \quad (3-14)$$

工作物の表面が不働態化膜で完全に覆われる場合には、

$$r_w = D_w / 2 \quad (3-15)$$

であるから、式(3-15)を式(3-12)に代入すると

$$R_g = \rho_w \cdot \frac{h_w}{\pi \cdot \frac{D_w^2}{4}} \quad (3-16)$$

が得られる。式(3-16)を式(3-14)と等価とおき、投入電気量 q について解くと次の式(3-17)が得られる。

$$q = \frac{1}{k} \cdot A_e \quad (3-17)$$

ここに $A_e [\text{cm}^2]$ は工作物の面積である。式(3-17)は工作物の表面が不働態化膜で完全に覆われるのに要する投入電気量を表し、以後この電気量を飽和電気量 q_c ということにする。

(2) ギャップ抵抗 R_g に影響を与える因子

図3-20はパルス状の電圧を印加した場合に流れる電解電流 I を測定して得られた投入電気量 q とギャップ抵抗 R_g の関係をプロットしたものである。投入電気量 $q=0$ の場合には、工作物の表面に不働態化膜が生成されていないためにギャップ抵抗 R_g は最小となる。ギャップ抵抗 R_g は投入電気量 q の増加とともに増大するが、約 $20 [\mu\text{C}]$ の電気量

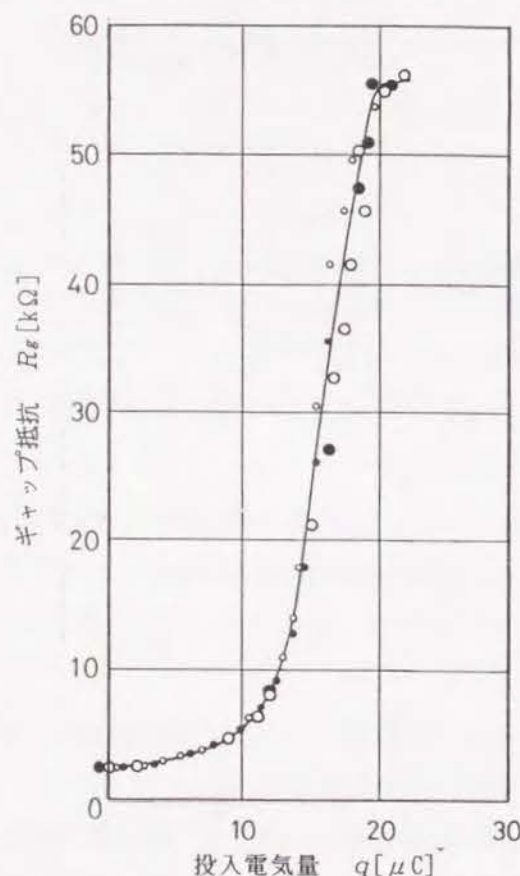


図3-20 投入電気量とギャップ抵抗の関係
(JIS2種純Ti, $A_e = 3 \times 10^{-4} [\text{cm}^2]$,
1%aq. NaNO_3 , $I_g = 3 [\text{mm}]$, $V_g = 10 [\text{V}]$)
(○ $T_{ON} = 10 [\text{ms}]$, ● $T_{ON} = 5 [\text{ms}]$,
□ $T_{ON} = 1 [\text{ms}]$, ■ $T_{ON} = 0.5 [\text{ms}]$)

が投入されると、ギャップ抵抗 R_g は約 $55 [\text{k}\Omega]$ で一定になった。図3-20において、ギャップ抵抗 R_g は電圧の継続時間 T_{on} には無関係であるので、不働態化膜の生成によってギャップ抵抗 R_g が増加したものと考えられる。

工作物の面積 A_e を変えて電解電流 I の変化を測定し、投入電気量 q とギャップ抵抗 R_g の関係を調べた結果を図3-21に示す。工作物の面積 A_e が増加するとギャップ抵抗 R_g は減少するが、抵抗値 R_g が一定になるのに要する投入電気量を表す飽和電気量 q_c は増大している。3-3-4(1)の考察により、飽和電気量 q_c は工作物の面積 A_e に比例すると考えられる。両者の関係をプロットすると図3-22のようになり、両者は比例関係にあることが確かめられた。以上より、不働態化膜は電気量 q に比例して、2

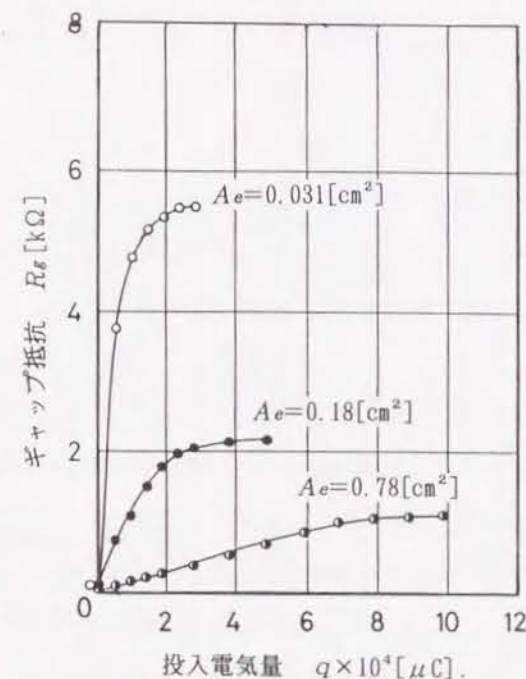


図3-21 工作物の面積を変えたときの投入電気量とギャップ抵抗の関係
(JIS2種純Ti, 1%aq. NaNO_3 ,
 $I_g = 3 [\text{mm}]$, $V_g = 10 [\text{V}]$)

次元的な拡がり方で工作物の表面を覆っていくモデルが正しいことが確かめられた。

次にギャップ電圧 V_g がギャップ抵抗 R_g に与える影響について考察する。ギャップ電圧 V_g が増加すると電解電流 I が増大し、単位時間あたりに電極に投入される電気量 q は増加する。ギャップ電圧 V_g をパラメータとして、投入電気量 q とギャップ抵抗 R_g の関係を調べると、図3-23に示すような結果が得られた。ギャップ電圧 V_g が約 $14 [\text{V}]$ までは、ギャップ電圧 V_g の増加につれてギャップ抵抗 R_g の飽和値が大になり、また飽和電気量 q_c が大になる。 $14 [\text{V}]$ 以上のギャップ電圧 V_g を印加すると、飽和電気量 q_c は増すが、ギャップ抵抗 R_g の飽和値は減少した。なぜこのような現象が生じるかは、現段階では不明である。

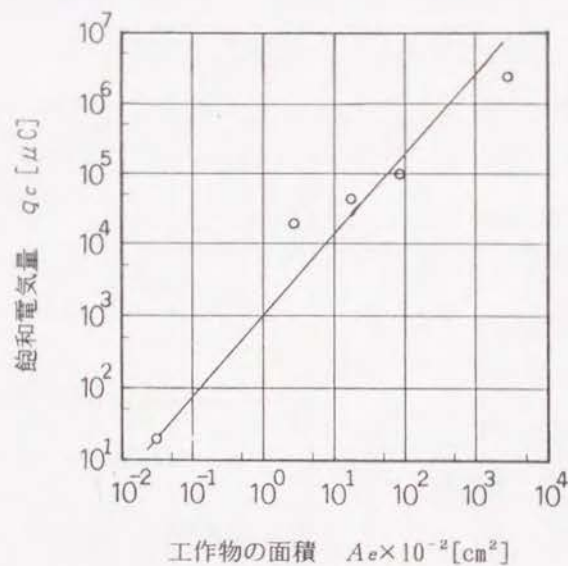


図3-22 工作物の面積と飽和電気量の関係
(JIS2種純Ti, 1%aq. NaNO₃, $I_g=3$ [mm], $V_g=10$ [V])

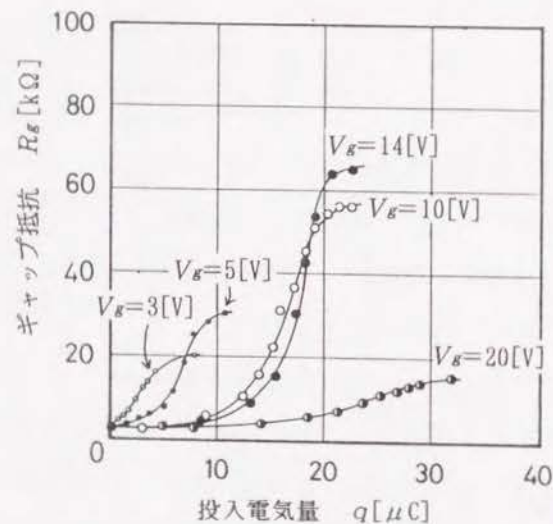


図3-23 ギャップ電圧 V_g を変えた場合に投入電気量がギャップ抵抗に与える影響
(JIS2種純Ti, $A_e=3 \times 10^{-4}$ [cm²], 1%aq. NaNO₃, $I_g=3$ [mm])

3-4 結論

工作物が砥粒で擦過されない場合における、不働態化膜の生成機構を明らかにするために、ギャップ電圧 V_g を印加した初期の電解電流 I の変化を測定し、不働態化膜の生成にともなうギャップ抵抗 R_g の変化する様子を検討した。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 電解電流 I はギャップ電圧 V_g を印加した直後に最大となり、その後過渡的に減少して一定値になるが、これは不働態化膜の生成にともなうギャップ抵抗 R_g が增大するためである。Tiの表面に生成される不働態化膜はかなり大きな電気抵抗をもつが、静電容量はきわめて小さい。
- (2) 不働態化、過不働態化は分解電圧 V_o を境に分けられ、分解電圧 V_o より低い電圧領域は不働態化域、分解電圧 V_o より高い領域は過不働態化域となる。不働態化域では陽極に不働態化膜が生成されるために、ギャップ抵抗 R_g が増大して電解電流 I が流れ難くなる。過不働態化域では、工作物の表面に局所的な溶出痕が形成され、ギャップ抵抗 R_g は電解液の抵抗 R_e とほぼ等しくなる。
- (3) Tiの不働態化膜は、TiとOの化合物からなり、その膜厚 h は印加したギャップ電圧 V_g が高くなるほど増す。不働態化した工作物の表面に色がつくのは、不働態化膜によって光の干渉が生じるためである。
- (4) 不働態化膜は、工作物の表面上の核となる部分を中心にして、2次元的に拡がりながら成長する。工作物の表面が不働態化膜で完全に覆われると電解電流 I は一定になる。
- (5) 不働態化膜は投入電気量 q に比例して生成され、表面が不働態化膜で覆われるのに要する飽和電気量 q_c は工作物の面積 A_e に正比例する。

第4章 電解パフ複合加工機構の解析 (そのⅡ)

— 電解と砥粒擦過による複合除去作用の解析 —

4-1 緒 論

本章においては、電解パフ複合加工において前章で説明した不動態化膜の生成の後に続いて生じる現象、すなわち3ページで述べた加工機構の中の②の砥粒の擦過による不動態化膜の除去と、③の砥粒擦過後の新生面の溶出の機構について検討する。

多数の砥粒が付着しているパフ研磨材で工作物の表面を擦過すると、砥粒と工作物の相対運動から定まる軌跡からなる多数の擦過条痕が生成される。生成される擦過条痕の幅と深さは、パフ研磨材に加えた荷重 F 、固着された砥粒の大きさなどによって変わるが、砥粒の粒径は数 $[\mu\text{m}]$ ～ 数 $10[\mu\text{m}]$ と非常に小さいので、1個の砥粒の擦過で除去される量はわずかである。電解作用により不動態化膜が生成された工作物の表面をパフ研磨材で擦過した場合について考えると、第3章の3-3-2で明らかにしたように純Tiの場合を例にとると、その不動態化膜の膜厚 h_{ss} はたかだか $1[\mu\text{m}]$ 以下であるので、擦過によって不動態化膜だけでなく金属の素地の一部も除去される可能性がある。

素地が露出した工作物に電解電流 I が流れると、第3章の3-3-4で明らかにしたような機構で新たな不動態化膜が生成される。不動態化膜の生成過程で工作物の表面が多数の砥粒によって断続的に擦過される場合には、不動態化膜が十分生成されない中に再び砥粒の擦過作用を受けることもある。この場合には工作物表面は加工中常に素地が露出していることになる。

前述のように、このような機械的な除去作用と電解作用を複合させた場合の工作物の表面が、どのような状態になっているのかを調べた研究は今までほとんど行われていない。そこで、単一砥粒の擦過によって生じる電解反応の変化を調べることににより、不動態化膜の生成と除去の過程を明らかにすることとした。その際以下の点に注意した。

- (1) 不動態化膜が単一砥粒の擦過で除去される面積は非常に小さいので、素地が露出した部分に流れる電解電流 I はきわめて小さい。このような微弱電流の測定が必要である。
- (2) 砥粒による擦過作用と電解による不動態化膜の生成作用は時間的に変化するもので、動的な計測が必要である。

そこで本章では、まず回転円盤型の複合工具電極によって工作物に形成される砥粒の擦過軌跡を解析し、次に単一の砥粒からなる複合工具電極を用いて電解パフ複合加工を行ない電解電流 I を測定する。次に、工作物上に電解電流 I を測定するための微小な擦過領域を設け、この領域がパフ研磨材で擦過されながら電解作用を受ける場合の電解電流 I を測定し、電解と砥粒擦過の複合による除去作用について検討することとした。

本章の構成は次のようになっている。4-2節ではパフ研磨材を回転円盤型複合工具に取り付けた場合の砥粒の擦過軌跡と、擦過にともなう工作物の温度上昇について解析を行う。4-3節では工作物が砥粒で擦過された場合の電解電流 I を測定するための実験装置と方法について述べ、4-4節ではこれらの実験結果に基づいて電解と砥粒擦過の複合による除去作用について考察する。4-5節は以上をまとめた結論である。

4-2 砥粒の擦過軌跡と工作物の温度上昇の解析

4-2-1 砥粒の擦過軌跡

回転円盤型の複合工具電極に装着されたパフ研磨材の1つの砥粒の運動は図4-1に示すように、複合工具電極の回転運動による速度ベクトル V_R $[\text{mm/s}]$ と X 軸方向への送り運動による速度ベクトル V_f $[\text{mm/s}]$ の2つの速度ベクトルで与えられる。

複合工具電極の回転数 N_R と、送り速度 V_f が一定の場合、回転運動の速度ベクトル V_R は、回転中心Oを中心としベクトルの大きさが一定でベクトルの向きが時間 t の経過とともに常に変化する。また送り運動による速度ベクトル V_f は大きさ、向きとも常に一定である。

回転中心Oから半径 R $[\text{mm}]$ の位置 (以後、複合工具電極中心からの半径という) にある砥粒Gは t $[\text{s}]$ 後に

$$\left. \begin{aligned} X &= R \cdot \cos(\omega \cdot t) + V_f \cdot t \\ Y &= R \cdot \sin(\omega \cdot t) \end{aligned} \right\} (4-1)$$

の位置にある。ただし、砥粒Gは $t=0$ のとき、 $X=R$ 、 $Y=0$ の位置にあるものとする。ここに ω $[\text{deg/s}]$ は複合工具電極の回転角速度で、回転数が N_R $[\text{rpm}]$ の場合には

$$\omega = 360 \cdot N_R / 60 \quad (4-2)$$

となる。

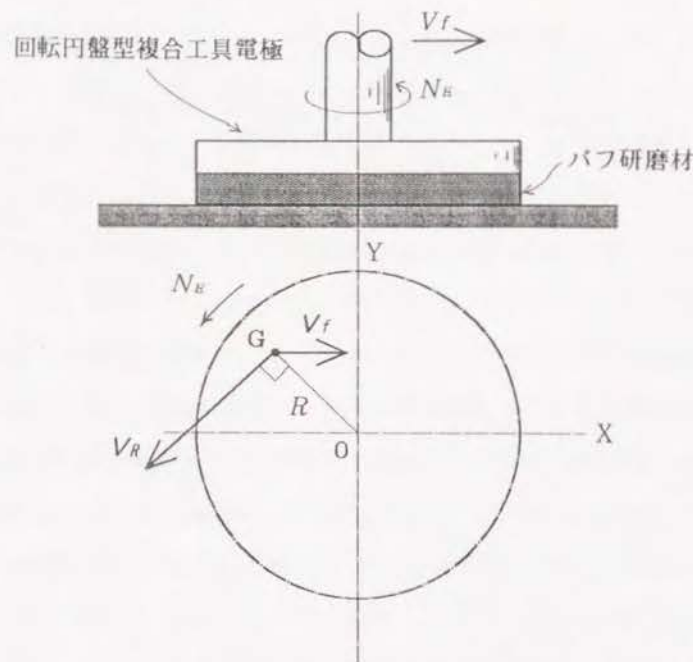


図4-1 回転円盤型複合工具電極の砥粒の速度ベクトル

複合工具電極が1回転する間に砥粒Gが描く軌跡すなわち擦過条痕は、式(4-1)で与えられ、これを図示すると図4-2のようになる。軌跡の接線がX軸となす角度を条痕傾斜角 θ_E [deg]と定義すると、これは

$$\begin{aligned}\theta_E &= \tan^{-1} (dY/dX) \\ &= \tan^{-1} \left(\frac{\omega \cdot R \cdot \cos(\omega \cdot t)}{V_f - \omega \cdot R \cdot \sin(\omega \cdot t)} \right) \quad (4-3)\end{aligned}$$

として表される。X軸に平行でY軸上の点P(0, H_c)を通過するX'軸が軌跡となす角度は

$$\begin{aligned}H_c &= R \cdot \sin(\omega \cdot t) \\ \omega \cdot t &= (n \cdot \pi + (-1)^n \cdot \theta_0) \\ n &= 1, 2, 3, \dots\end{aligned} \quad (4-4)$$

となる。ここで θ_0 [deg]は初期位相角で

$$\theta_0 = \sin^{-1} (H_c/R) \quad (4-5)$$

で表される。

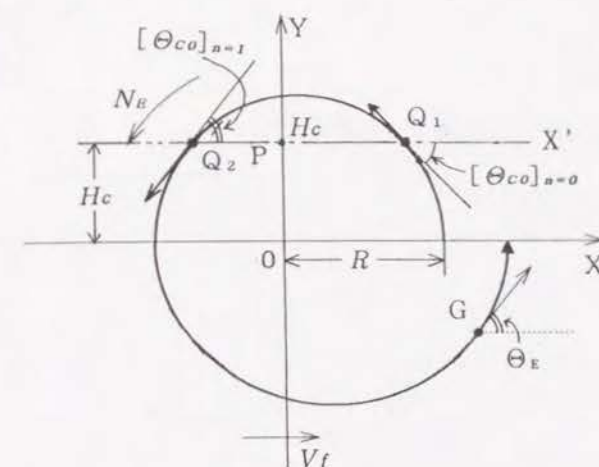


図4-2 砥粒の運動軌跡

軌跡がX'軸と交差する点 Q_1, Q_2, \dots での条痕傾斜角 θ_{co} は式(4-4)を式(4-3)に代入して

$$\theta_{co} = \tan^{-1} \left(\frac{\omega \cdot R \cdot \cos(n \cdot \pi + (-1)^n \cdot \theta_0)}{V_f - \omega \cdot R \cdot \sin(n \cdot \pi + (-1)^n \cdot \theta_0)} \right) \quad (4-6)$$

となる。

X'軸上の工作物は時間 t の経過に伴い、まず式(4-6)において $n=0$ で表される傾斜角 $([\theta_{co}]_{n=0})$ をもつ擦過条痕が形成され、次に $n=1$ で表される傾斜角 $([\theta_{co}]_{n=1})$ をもつ擦過条痕が形成される。そこでこの2つの擦過条痕がX'軸上の点 Q_1 において交差する場合、2つの擦過条痕の交差角 $\Delta\theta$ [deg]を

$$\Delta\theta = |180^\circ - ([\theta_{co}]_{n=0} - [\theta_{co}]_{n=1})| \quad (4-7)$$

として定義する(図4-3参照)。砥粒Gの擦過条痕の交差角 $\Delta\theta$ は複合工具電極の中心からの半径 R に応じて図4-4に示すように変化する。

いま1個の砥粒Gによって描かれた軌跡について、軌跡の間隔 ΔX と ΔY を図4-5のように定義する。X軸方向の軌跡の間隔 ΔX は、回転円盤型複合工具電極の1回転当たりの工作物の送り f [mm/rev]として

$$\Delta X = 60 \cdot f \quad (4-8)$$

$$\text{ただし } f = \frac{V_f}{N_E}$$

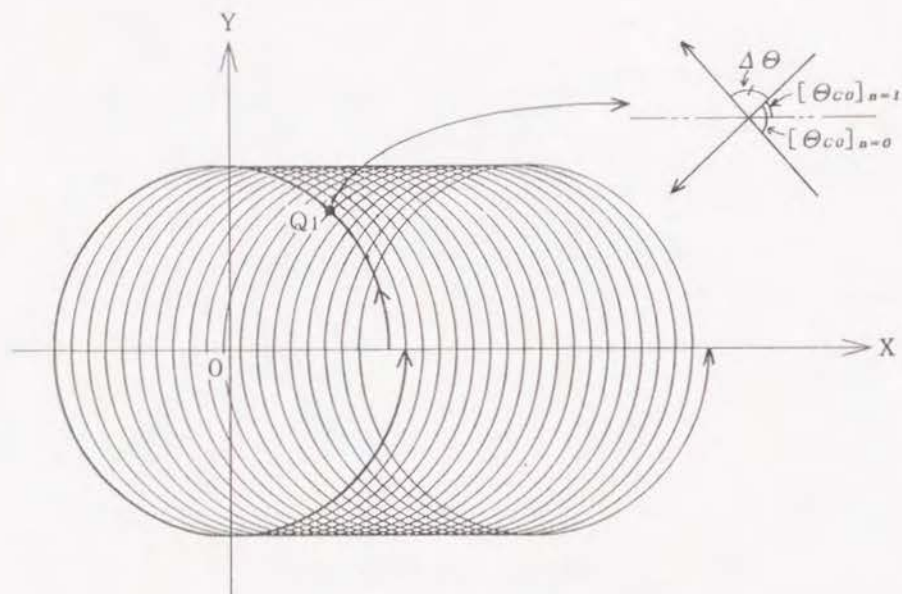


図4-3 擦過条痕が交差する場合の交差角の定義

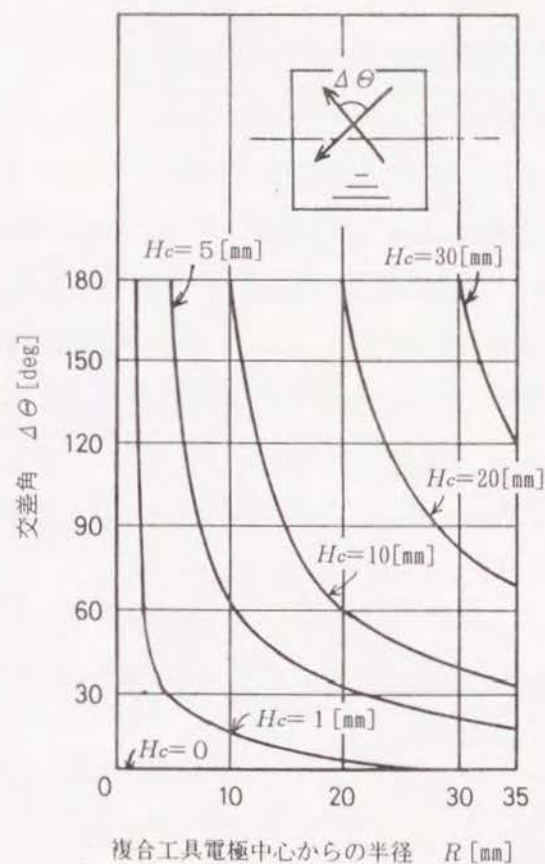


図4-4 複合工具電極中心からの半径が異なる砥粒によって形成される擦過条痕の交差角

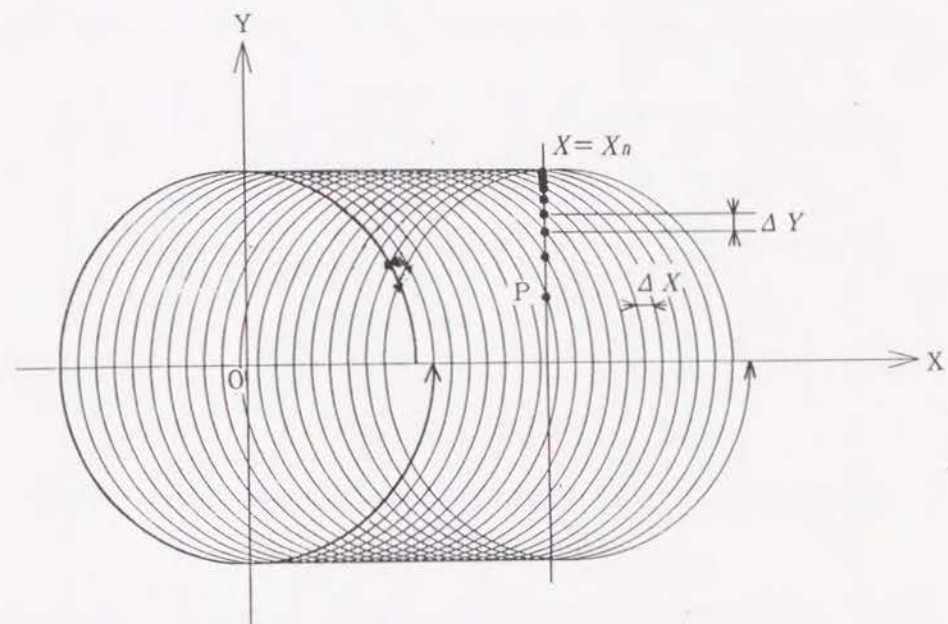


図4-5 軌跡の間隔 ΔX と ΔY の定義

となる。したがってX軸方向の軌跡の間隔 ΔX はどこでも一定になる。

Y軸方向の軌跡の間隔 ΔY を求めるには、まず図4-5において直線 $X = X_n$ を考えて、この直線と軌跡の交点PのY座標を求める。交点Pは前述の式(4-1)において $X = X_n$ を満足する点として与えられる。Y軸方向の軌跡の間隔 ΔY はとなりあう交点Pの間隔として与えられる。

ここでは、 $X_n > R$ の関係を満たす直線 $X = X_n$ 上の交点Pを数値計算により求め、Y軸方向の軌跡の間隔 ΔY を計算した結果を図4-6に示す。なお計算条件は複合工具電極中心から半径 $R = 35$ [mm] の位置に磨かれた砥粒が、複合工具電極の回転により回転数 $N_s = 620$ [rpm] で回転し、工作物の送り速度 V_f は 510 [mm/min] とした。同図よりY軸方向の軌跡の間隔 ΔY はY軸方向の位置によって変わり、複合工具電極中心から離れる(Yが大きくなる)ほど小さくなる事が分かる。したがって回転円盤型の複合工具電極の中心から離れた位置ほど表面粗さはよくなる。

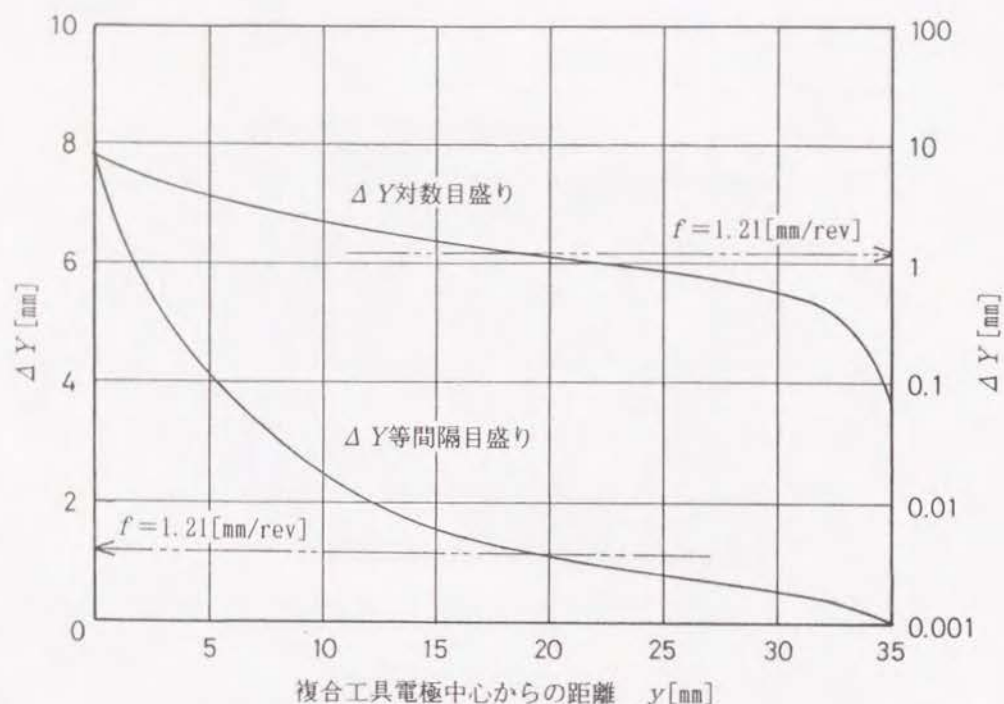


図4-6 Y軸方向の軌跡の間隔 ΔY の計算例
($N_B=620$ [rpm], $V_f=510$ [mm/min], $R=35$ [mm])

4-2-2 作用砥粒数

工作物上にある微小な擦過領域Aを回転円盤型の複合工具電極が通過すると、擦過領域Aは多数の砥粒で擦過されるのでその作用砥粒数を解析する(図4-7参照)。

いま擦過領域Aが複合工具電極の中心から距離 y の位置(以後、複合工具電極中心からの距離という)にあるとすると、擦過領域Aは半径 R_B の回転円盤型の複合工具電極の中心に対する半径が異なる多数の砥粒で擦過される。その半径 r [mm]を複合工具電極の回転角 θ [rad]の関数として表すと、

$$r = \sqrt{\left(\frac{V_f}{2\pi \cdot N_B}\right)^2 \theta^2 - 2 \cdot V_f \cdot \frac{1}{2\pi \cdot N_B} \cdot \sqrt{R_B^2 - y^2} \cdot \theta + R_B^2} \quad (4-9)$$

となる。式(4-9)を極座標系で表すと、複合工具電極上では図4-8に示すような螺旋状の軌跡が得られる。軌跡は擦過領域Aの複合工具電極中心からの距離 y によって異なり、 $y=0$ の工具中心上では複合工具電極の回転角 θ の増大とともに半径 r が一定の割合で小さくなる。 $y \neq 0$ の場合には、回転角 θ の増大に対する半径 r の減少の割合は一定でなく、回転角 θ が増加するにつれて減少の割合が小さくなる。

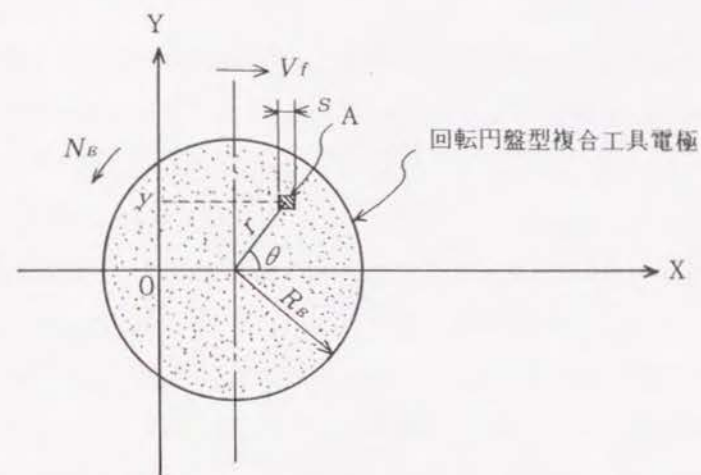


図4-7 工作物上の微小な擦過領域Aと回転円盤型複合工具電極の位置関係

この螺旋の長さは擦過領域Aを通過するバフ研磨材の長さ L_{ry} [mm]を表すのでこれを求める。すなわち、

$$L_{ry} = 2 \cdot \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sqrt{(a \cdot \theta^2 + b \cdot \theta + c) + \frac{(2 \cdot a \cdot \theta + b)^2}{4(a \cdot \theta^2 + b \cdot \theta + c)}} d\theta \quad (4-10)$$

$$\text{ここに } a = \left(\frac{V_f}{2\pi \cdot N_B}\right)^2$$

$$b = -\frac{V_f \cdot \sqrt{R_B^2 - y^2}}{\pi \cdot N_B}$$

$$c = R_B^2$$

$$\theta_1 = \sin^{-1}(y/R_B)$$

$$\theta_2 = 2\pi \cdot \frac{N_B \cdot \sqrt{R_B^2 - y^2}}{V_f}$$

となる。

擦過領域AのX軸方向の幅を s [mm]とすると、ここを通過する作用砥粒数 M_{sy} [個]は

$$M_{sy} = L_{ry} \cdot s \cdot m_s \quad (4-11)$$

で与えられる。ここに m_s [個/mm²]は第2章の2-3-1で述べたバフ研磨材の砥粒密度である。

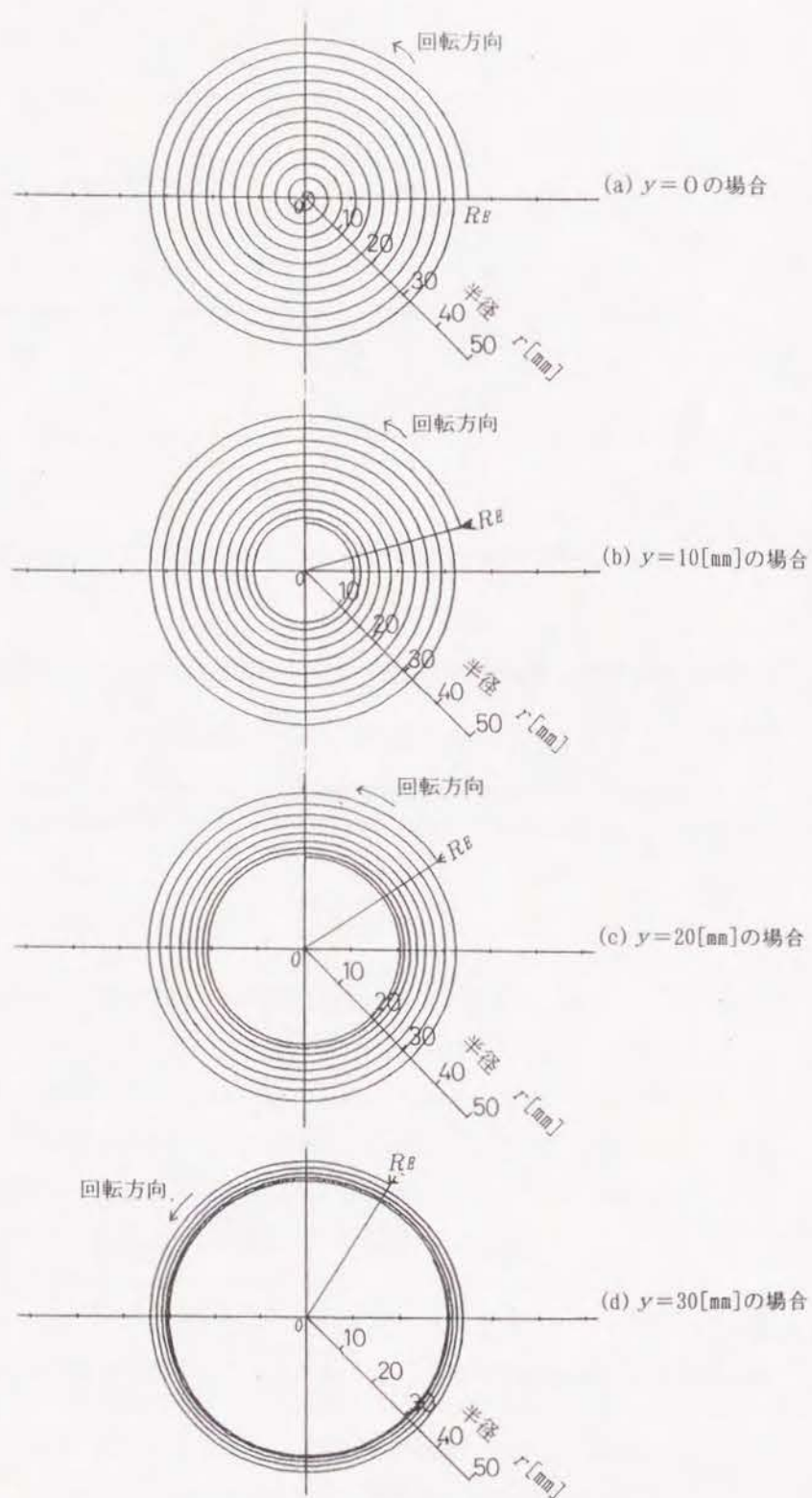


図4-8 工作物上の微小な擦過領域を通過するバフ研磨材の複合工具電極中心からの半径の軌跡の計算例 ($N_R=100$ [rpm], $V_f=300$ [mm/min], $R_E=35$ [mm])

いま例として幅 $s=1$ [mm] の擦過領域 A を通過する作用砥粒数 M_{sy} を任意の位置 y について計算すると図4-9が得られた。なお計算条件は、半径 $R_E=35$ [mm] の回転円盤型の複合工具電極が回転数 $N_R=620$ [rpm] で回転するとし、工作物の送り速度 V_f は 510 [mm/min]、バフ研磨材の長さ L_{ry} はシンプソン法による数値積分によって求めた。

作用砥粒数 M_{sy} は複合工具電極中心からの距離 y によって変わり、中心から外縁に向けて作用砥粒数 M_{sy} は増大して、 $y=20$ [mm] 付近で最大になり、ここから外縁にかけては急激に減少する。このように作用砥粒数 M_{sy} が工具電極中心が通過する位置において最大にならないのは、前述のように、 $y=0$ の場合に比べて $y \neq 0$ の場合の方が回転角 θ の増大に対する半径 r の減少の割合が小さいためである。

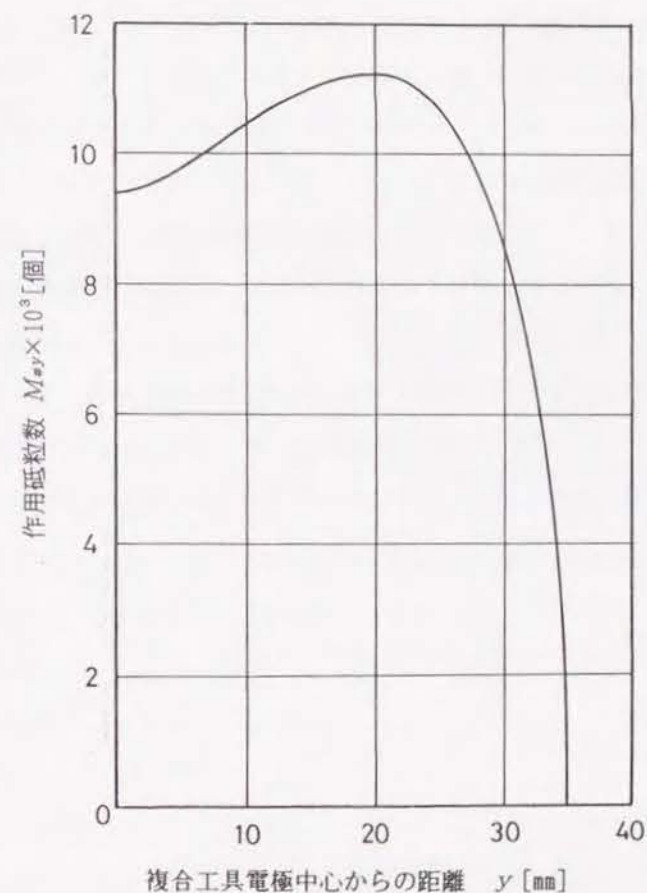


図4-9 幅 $s=1$ [mm] の微小な擦過領域を通過する作用砥粒数の計算例 ($N_R=620$ [rpm], $V_f=510$ [mm/min], $R_E=35$ [mm], $m_s=1$ [個/mm²])

4-2-3 工作物の温度上昇

(1) 解析方法

バフ研磨材を用いて工作物を研磨すると、バフ研磨材の温度が上昇する。温度上昇の程度は工作物の種類、擦過する速度、冷却液の有無などによって変わり、ステンレス鋼やTiのような熱伝導率の低い材料を冷却液を用いずに比較的高速で擦過した

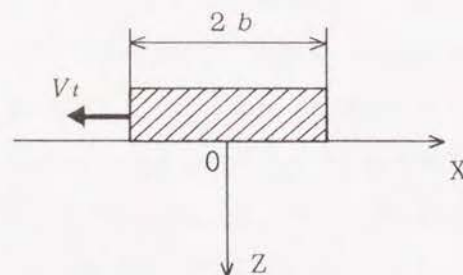


図4-10 移動熱源による温度解析モデル^{jaeger}

場合には、温度上昇はかなり高くなる。擦過にともなう温度上昇は、バフ研磨材の砥粒に与えた運動エネルギーによって塑性変形が生じ、それが熱エネルギーに変わるために生じる。この工作物が砥粒で擦過される際に生じる温度上昇の大きさについて考察する。

温度解析のモデルとしては、砥粒が Al_2O_3 などの熱の不良導体であり、かつ一つの砥粒の大きさに比べて工作物の表面ははるかに大きいので、Jaegerの移動熱源による温度解析モデルを用いることとする³²⁾。

いま図4-10に示すように熱の伝導体の半無限の工作物表面上を、熱の絶縁体である長さ $2b$ [m]の滑り台が単位時間単位面積あたり q_t [cal/s·m²]の熱流束を出しながら速度 V_t [m/s]で移動する場合、工作物内の温度 θ_t [°C(K)]は式(4-12)で与えられる。

$$\theta_t = \frac{2 \cdot K \cdot q_t}{\pi \cdot \kappa_t \cdot V_t} \int_{x-L}^{x+L} e^{-u} \cdot K_0(Z^2 + u^2)^{1/2} du \quad (4-12)$$

ここで

$$X = V_t \cdot X / 2 \cdot K$$

$$Z = V_t \cdot Z / 2 \cdot K$$

$$L = V_t \cdot b / 2 \cdot K$$

$$K = \kappa_t / C_t \cdot \sigma$$

κ_t : 工作物の熱伝導率[cal/m·s·°C(K)]

C_t : 工作物の比熱[cal/kg·°C(K)]

σ : 工作物の密度[kg/m³]

K_0 : 0次の第2種変形ベッセル関数

なお熱源の熱流束 q_t は、図4-11に示すように直径 d_a [m]の砥粒がくい込み量 h_d [m]で工作物を擦過する場合、

$$q_t = \frac{1}{0.427} \cdot \frac{T_s \cdot A_d \cdot V_t}{A_d} = \frac{1}{0.427} \cdot T_s \cdot V_t \quad (4-13)$$

で近似できる。ここに T_s [kg/m²]は工作物の引張り強さである。 A_d [m²]は砥粒と工作物の接触面積で、直径 d_a 、高さ h_d の球冠の1/2が工作物に接触すると仮定すると

$$A_d = \pi \cdot d_a \cdot h_d / 2 \quad (4-14)$$

で表される。

工作物表面の温度は式(4-12)において $Z=0$ とおけば求められる。計算結果を無次元化して表すと図4-12のようになる。図4-12において表面温度は滑り台と固体の接触域内

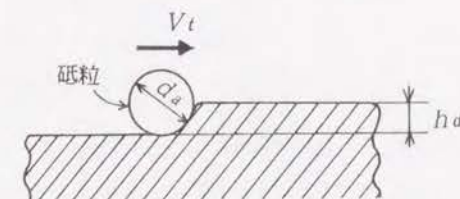


図4-11 砥粒の擦過による工作物の除去モデル

($-1 \leq b/x \leq 1$)で最も高くなり、極大値 θ_m [°C(K)] (以後、最高温度上昇という)をとることが分かる。この極大値 θ_m はJaegerによると次のようになる。

$L > 5$ の場合

$$\theta_m = 1.128 \cdot q_t \cdot b / \kappa_t \cdot \text{sqrt}(L) \quad (4-15)$$

$L < 5$ の場合

$$\theta_m = 0.636 \cdot K \cdot q_t \cdot f_m / \kappa_t \cdot V_t \quad (4-16)$$

ただし f_m は L の値によって変わり、図4-13のように与えられる。

次に、熱源が通過する際の工作物内部の温度分布を考える。工作物上の任意の点において、熱源が通過する際の表面温度の時間的変化を図4-14のようにステップ関数と仮

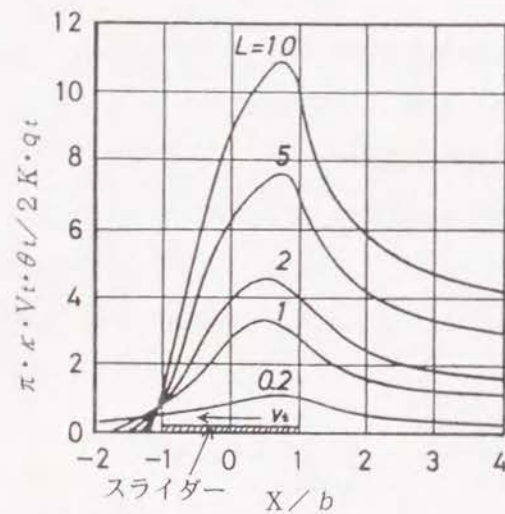


図4-12 熱源の移動にともなう表面温度の変化^(Jaeger)

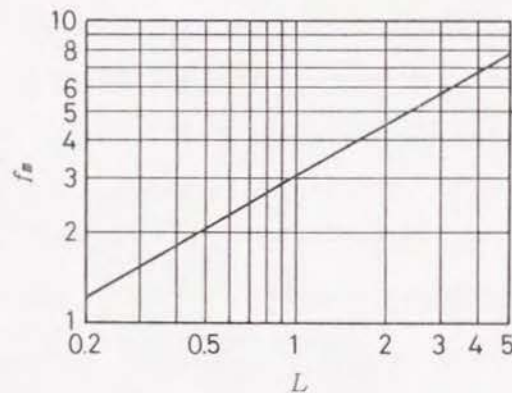


図4-13 係数 f_m の値^(Jaeger)

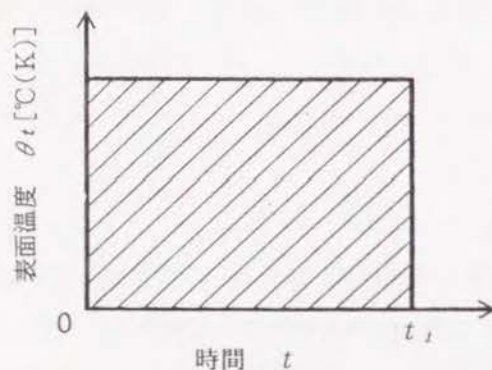


図4-14 表面温度の時間的变化

定した場合、工作物内部の温度 θ_z [°C(K)] は式 (4-17) で表される⁽³³⁾。

$$\left. \begin{aligned} (t \leq t_1 \text{ のとき}) \\ \theta_z = \theta_m \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{Z}{2 \cdot \sqrt{\kappa_t \cdot t}} \right) \\ \\ (t > t_1 \text{ のとき}) \\ \theta_z = \theta_m \cdot \left\{ \operatorname{erf} \left(\frac{Z}{2 \cdot \sqrt{\kappa_t \cdot (t - t_1)}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{Z}{2 \cdot \sqrt{\kappa_t \cdot t}} \right) \right\} \end{aligned} \right\} \quad (4-17)$$

ここに $\operatorname{erfc}(\xi)$ はガウスの誤差関数で

$$\operatorname{erfc}(\xi) = 1 - \operatorname{erf}(\xi)$$

の関係がある。また t_1 [s] は熱の継続時間で

$$t_1 = 2 \cdot b / V_t \quad (4-18)$$

で与えられる。

(2) 解析結果

式 (4-15) と (4-16) を用いて、本研究で工作物として用いた材料（ステンレス鋼 SUS304、構造用炭素鋼 S45C、純 Ti 2 種、工業用純アルミニウム A1050 および無酸素鋼 C1020）について、バフ研磨材で加工中の温度上昇を計算した。擦過速度 V_t は 0～5 [m/s]、砥粒のくい込み量 h_d は 3 [μm]、砥粒の粒径 d_a は 10 [μm] とした。計算に用いた各種材料の物理的性質を表 4-1 に示す。

得られた工作物表面の最高温度上昇 θ_m を擦過速度 V_t を変数として図 4-15 に示す。擦過速度 $V_t = 2$ [m/s] の場合に各種材料の最高温度上昇 θ_m は次のようになった。

ステンレス鋼 SUS304	$\theta_m = 293.7 [^{\circ}\text{C(K)}]$
構造用炭素鋼 S45C	$\theta_m = 160.8 [^{\circ}\text{C(K)}]$
純 Ti 2 種	$\theta_m = 260.4 [^{\circ}\text{C(K)}]$
工業用純アルミニウム A1050	$\theta_m = 27.5 [^{\circ}\text{C(K)}]$
無酸素鋼 C1020	$\theta_m = 18.4 [^{\circ}\text{C(K)}]$

熱伝導率 κ_t の大きい工業用純アルミニウムと無酸素鋼 C1020 の最高温度上昇 θ_m はそれぞれ 27.5 [°C(K)], 18.4 [°C(K)] と低く抑えられ、構造用炭素鋼 S45C は 160.8 [°C(K)] と中間になり、これらの材料に比べて熱伝導率 κ_t の小さい純 Ti 2 種とステンレス鋼

表4-1 各種金属材料の物理的性質

	ステンレス鋼 SUS304	構造用炭素鋼 S45C	工業用純Ti 第2種	工業用純Al A1050	無酸素銅 C1020
融点 [°C]	1,400~1,427	1,466~1,510	1,650~1,704	475~638	1,065~1,082
密度 [g/cm ³]	7.9	7.85	4.54	2.80	8.9
ヤング率 [kg/mm ²]	20×10 ³	19.6×10 ³	10.85×10 ³	7.28×10 ³	11.9×10 ³
熱伝導率 [cal/cm·s·°C]	0.031	0.14	0.041	0.29	0.93
熱膨張係数 [20~100°C]	16.5×10 ⁻⁶	11.6×10 ⁻⁶	8.6×10 ⁻⁶	23.6×10 ⁻⁶	16.8×10 ⁻⁶
比熱	0.12	0.11	0.13	0.23	0.10
ビッカース硬さ	180	179~235	170	20	55~100
引張り強さ [kg/mm ²]	40~60	60	35~63	7	20~30
比強度(引張り強さ/密度)	5~7.5	7.64	7.7~14.0	2.5	2.2~3.4

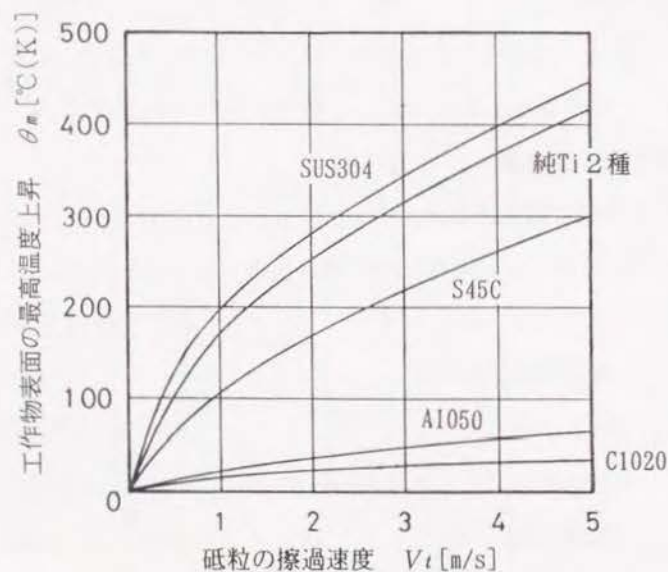


図4-15 砥粒の擦過速度と工作物表面の最高温度上昇の関係
(2b=10[μm])

SUS304は260.4[°C(K)], 293.7[°C(K)]とかなり高い。

擦過にともなって工作物内部で生じる温度上昇 θ_z を、式(4-17)を用いて熱伝導率 κ_t の小さい純Ti 2種と熱伝導率 κ_t の大きい無酸素銅C1020について計算した。擦過速度 V_t は2[m/s]、砥粒のくい込み量 h_d は3[μm]、砥粒の粒径 d_a は10[μm]とした。得られた工作物内部の温度上昇 θ_z を表面からの深さ Z を変数として図4-16に示す。表面からの深さ $Z=5$ [μm]の位置での温度上昇 θ_z は、砥粒の終端が通過する時点すなわち $t=t_1$ の場合では、

$$\text{純Ti 2種} \quad \theta_z = 120[^\circ\text{C(K)}]$$

$$\text{無酸素銅C1020} \quad \theta_z = 16[^\circ\text{C(K)}]$$

とかなりの差がある。

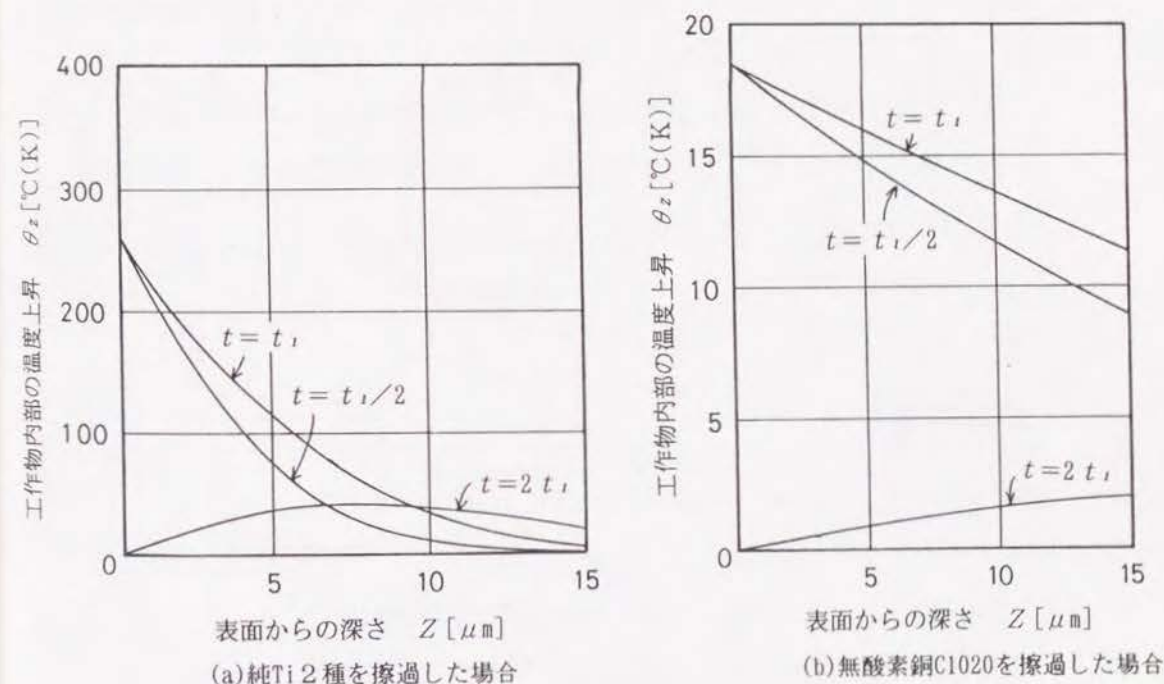


図4-16 砥粒の擦過にともなう工作物内部の温度上昇
(2b=10[μm], $V_t=2$ [m/s], $t_1=5 \times 10^{-6}$ [s])

次に使用した各種材料の化学的活性を比較する。金属の化学的活性とは、金属がその金属元素以外の元素との化合反応で新たな化合物を生成するしやすさをいう³⁴⁾。金属の単体原子が化合物に状態変化する際には、状態変化にともなうエネルギー(生成自由エネルギー ΔG^0 という)が放出される。化学的活性が高いか低い、化合物を生成する際の

生成自由エネルギー ΔG^0 の大きさを評価できる³⁵⁾。Fe, Ti, Al, CuがO、S、Nと反応して化合物を生成する際に生じる生成自由エネルギー ΔG^0 [kcal]の値を表4-2に示す³⁶⁾。各材料の ΔG^0 が負数になっているのは化合物が生成する際にエネルギーが放出されることを意味する。金属は ΔG^0 の負の値が大きくなるほど酸化されやすく、化学的活性が高くなる。表4-2からTiとAlはO、S、Nのいずれとも反応しやすく化学的活性が高いが、FeとCuはこれらの材料に比べて化学的活性が低いことが分かる。

純Tiは温度上昇と化学的活性の両方とも高い。したがって純Ti 2種を砥粒加工する場合にはこれらの影響についても十分考慮する必要があることが分かる。

表4-2 Fe, Ti, Al, CuがO, S, Nと反応する際の生成自由エネルギー ΔG^0

	Oとの反応		Sとの反応		Nとの反応	
	化合物	ΔG^0 [kcal]	化合物	ΔG^0 [kcal]	化合物	ΔG^0 [kcal]
Fe	2FeO	-118	2FeS	-65	2Fe ₃ N	-5
Ti	TiO ₂	-200	TiS	-120	TiN	-145
Al	2/3Al ₂ O ₃	-247	2/3Al ₂ S	-130	2/3AlN	-130
Cu	2Cu ₂ O	-67	2Cu ₂ S	-55		

4-3 実験装置と方法

実験装置として第3章で用いたNCフライス盤に搭載したものをを用いる。複合工具電極には図4-17に示すような単粒ダイヤモンドを装着した複合工具電極を用いる。

この複合工具電極は円盤状の電極の下面に先端半径0.1[mm]の単粒ダイヤモンドをりん青銅板で保持している。この構造は

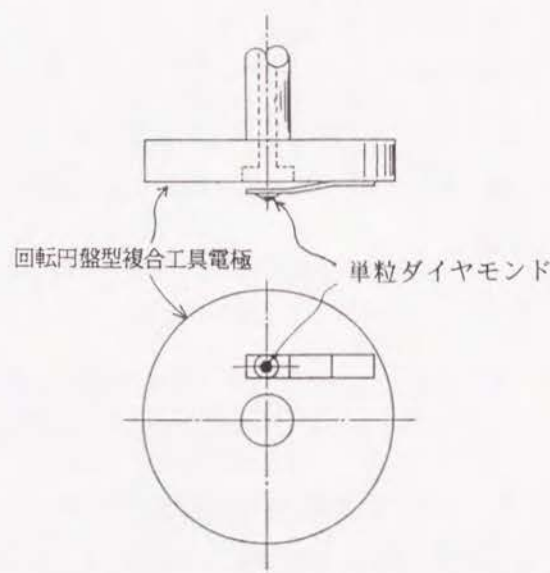


図4-17 単粒ダイヤモンドを用いた複合工具電極の構造

バフ研磨材の砥粒が低剛性の不織布で保持されているのを模したもので、単粒ダイヤモンドが工作物を押付ける力はいりん青銅板が弾性変形する際の反力によって得ている。

単粒ダイヤモンドからなる複合工具電極を用いた加工実験では、単粒ダイヤモンドが工作物を擦過する際の押付け力と電解電流 I の関係を調べる。押付け力は圧電素子を用いて測定する。図4-18はその構造を示す。2枚に重ねた圧電素子BaTiO₃の上にTiの薄片を載せて全体を黄銅製のホルダ内に収めている。Tiの薄片は黄銅製のホルダと電気的に導通しているが、周囲のTi板とは樹脂で絶縁されているので、電解電流 I はTiの薄片にのみ流れる。複合工具電極を回転させて単粒ダイヤモンドでTiの薄片を擦過させ、圧電素子BaTiO₃の出力電圧と電解電流 I を測定する。

バフ研磨材を用いた加工実験では、図4-19に示すようなバフ研磨材を装着した複合工具電極で、第3章で用いたTiワイヤを樹脂で埋込んだ工作物を加工する。加工中の電解電流 I はデジタルメモリを用いて測定する。また加工能率を調べる実験では工作物として幅100[mm]、長さ200[mm]、厚さ1[mm]の形状を有するJIS 2種の純Ti板を用いる。材料除去率 w は精密天秤で測定した加工前後の工作物の重量差と加工時間 t から求める。

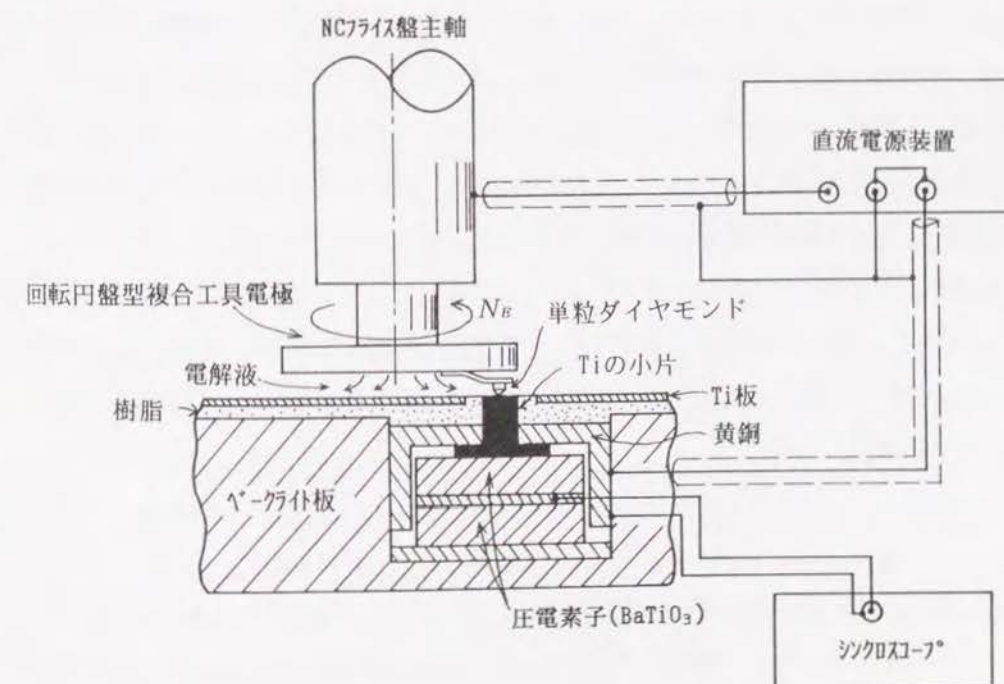


図4-18 圧電素子を組み込んだ工作物の構造

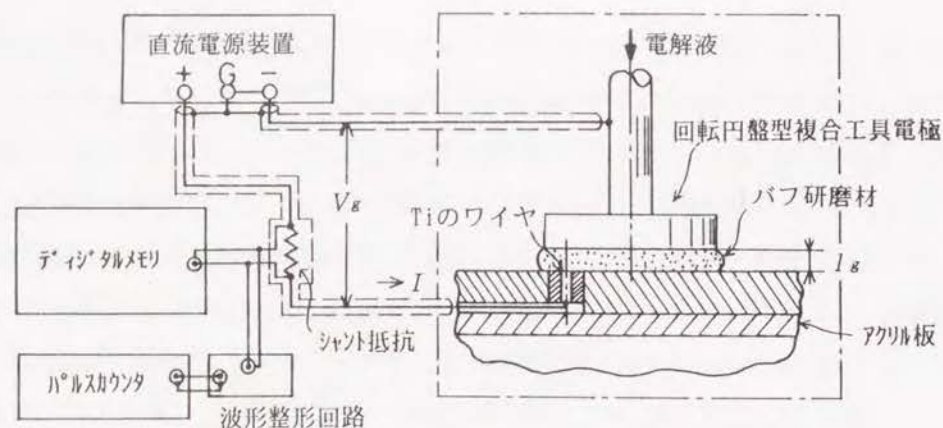


図4-19 バフ研磨材を装着した複合工具電極と電解電流の測定装置

4-4 実験結果と考察

4-4-1 単粒ダイヤモンドを用いた加工

(1) 圧電素子の校正

圧電素子を組み込んだ工作物は、縦向きの力を受けると圧電素子の静電容量によって力の大きさに比例した電圧を発生する。図4-20(a)に示すように、圧電素子を組み込んだ工作物に重量1[kg]の錘板を取り付けて全体を電磁加振機で振動させ、振動の振幅と圧電素子の出力電圧をシンクロスコープで測定し、圧電素子に加えられた力の大きさと出力電圧の関係を校正したところ図4-20(b)のような結果が得られた。

錘板の振動は圧電素子の共振周波数に比べてかなり低いので、圧電素子に加わる慣性力と出力電圧の関係は線形（圧電定数が一定）であると見なせる³⁷⁾。錘板の重量を W_m [kg]、振動の角速度を ω_b [rad/s]、振幅を S_b [mm]、重力の加速度を g [m/s²] とすると、慣性力 F_m [kgf] は

$$F_m = W_m \cdot \omega_b^2 \cdot S_b / g \quad (4-19)$$

となる³⁸⁾。図4-20(b)の測定結果を式(4-19)に代入して慣性力を求めると、 $F_m = 2.5$ [kgf] となるので、用いた圧電素子は3.1[kgf]の力が加わったとき1[mV]の電圧を発生することになる。

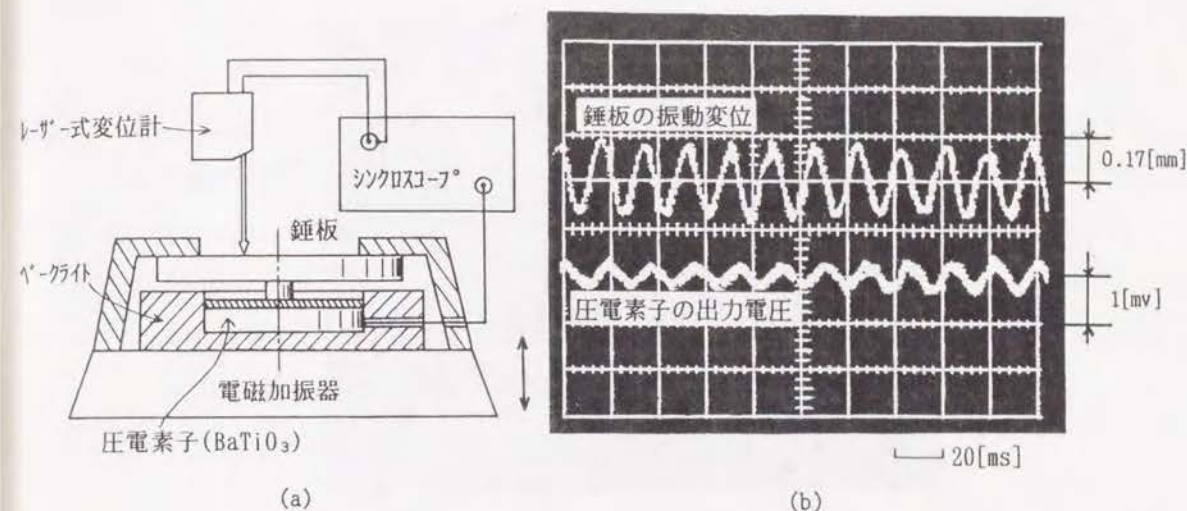


図4-20 圧電素子のキャリブレーション

(2) 単粒ダイヤモンドの擦過に伴う電解電流の変化

単粒ダイヤモンドを装着した複合工具電極で、圧電素子を組み込んだ工作物の加工を行った場合に測定された圧電素子の出力電圧と電解電流 I を図4-21に示す。複合工具電極の回転数 $N_s = 140$ [rpm]、ギャップ電圧 V_g は10[V]で、単粒ダイヤモンドは複合工具電極の中心から半径20[mm]の回転運動をすることによって工作物の表面を周期的に擦過している。図4-21において圧電素子の出力電圧は点Pを始点として最初に負極性の電圧が増加しているので、工作物には点Pから縦向きの力が加わり始めたことが分かる。この力は圧電素子の出力電圧が正極性に転じる点Qまで継続し、点Pから点Qに至る約12[ms]の時間は単粒ダイヤモンドが直径3.5[mm]の工作物を擦過するのに要する時間の11.9[ms]とほぼ一致する。

一方、電解電流 I は点Pから点Qにかけてほぼ直線的に増大したが、点Qを過ぎた後は急速に減少した。図4-22は複合工具電極が約3回転する間に測定された圧電素子の出力電圧と電解電流 I の波形を示したもので、2つの信号は複合工具電極の回転周期(0.43[s])に同期して周期的に変化している。

電解電流 I と圧電素子の出力電圧の測定結果を基にして工作物の表面で生じている電

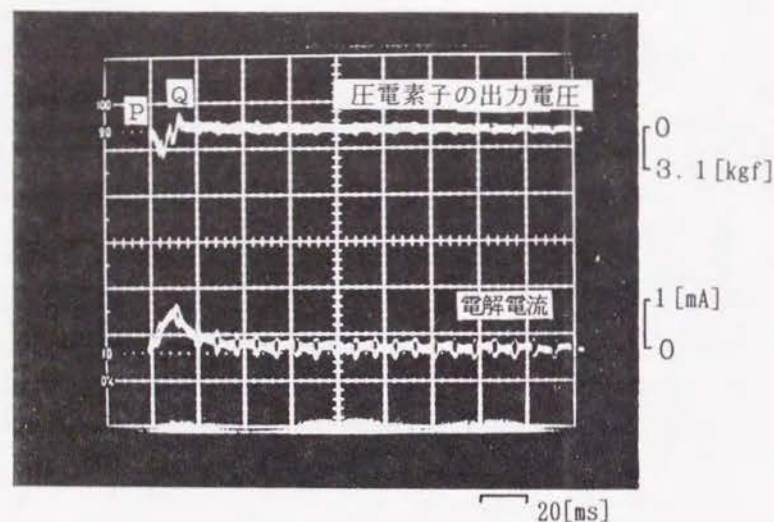


図4-21 圧電素子の出力電圧と電解電流

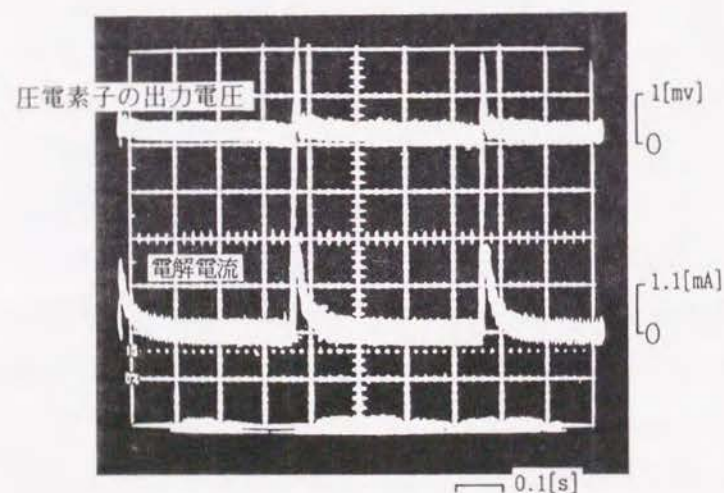


図4-22 圧電素子の出力電圧と電解電流の時間変化
(JIS2種純Ti, 1%aq. NaNO₃, $N_R=140$ [rpm], $V_g=10$ [V])

解反応について考察する。単粒ダイヤモンドを用いた場合の加工モデルを図4-23に示す。工作物は点Oを中心とする直径 D_w [mm]の円内が加工されるとし、砥粒Gは始点Uから点Oに向けて工作物の表面を微小に切削しているとする。砥粒Gは一定の速度 V_t [mm/s]で移動し、砥粒Gが通過した後は工作物の表面に幅 S_r [mm]の擦過条痕が形成される場合を考える。なお擦過条痕の深さはその幅に比べて無視できるほど浅いので、擦過されることによって露出した素地の実表面積は、条痕の幅と長さの積として表される見かけ上の面積とほとんど同じであるとする。

砥粒Gが擦過した後は不働態化膜が除去されているものとする、工作物の素地の露出面積は時間の経過とともに増加する。始点Uから時間 t [s]が経過した時の素地の露出面積 A_r [mm²]は

$$A_r = S_r \cdot V_t \cdot t \quad (4-20)$$

となる。砥粒の擦過によって電気抵抗の大きい不働態化膜が除去されると、素地が露出した部分のギャップ抵抗 R_g が減少してその部分に電解電流 I が流れやすくなる。

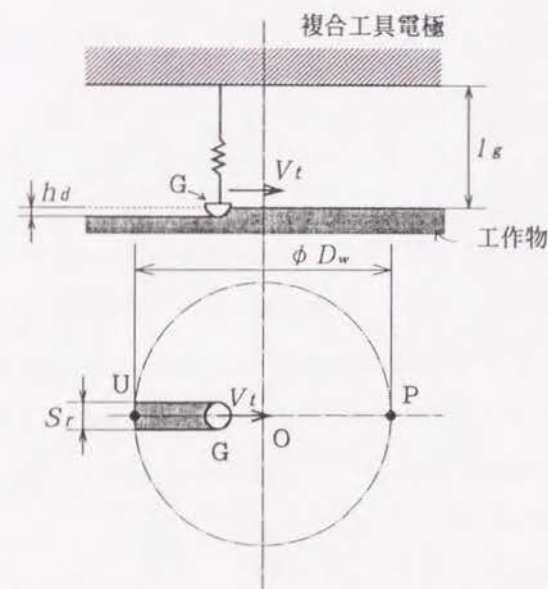


図4-23 単粒ダイヤモンドを用いた場合の加工モデル

第3章の3-3-3で述べたように不働態化膜の抵抗値は電解液の抵抗値に比べてはるかに大きいので、素地が露出した場合の陽極、陰極間のギャップ抵抗 R_g は素地の露出面積 A_r 、電解ギャップ l_g の電解液の抵抗で決まる。電解液の抵抗率を $\rho_e [\Omega \cdot \text{mm}]$ とすると、ギャップ抵抗 $R_g [\Omega]$ は式(4-21)で表される。

$$R_g = \rho_e \cdot \frac{l_g}{A_r} \quad (4-21)$$

式(4-21)を式(4-20)に代入すると不働態化膜が砥粒の擦過作用で除去される過程での抵抗の変化を表す次の式(4-22)が得られる。

$$R_g = \rho_e \cdot \frac{l_g}{S_r \cdot V_t \cdot t} \quad (4-22)$$

一方、ギャップ電圧 V_g が印加されている場合に流れる電解電流 I は

$$I = \frac{V_g}{R_g} = \frac{V_g \cdot S_r \cdot V_t}{\rho_e \cdot l_g} \cdot t \quad (4-23)$$

で表される。式(4-23)より不働態化膜が除去される過程では電解電流 I は時間に比例して増大することになる。なお電解電流 I は、図4-23において始点Uから移動する砥粒が擦過領域の終点Pに達した時に最大になり、その時の最大電流 I_p は次のようになる。

$$I_p = \frac{V_g \cdot S_r \cdot D_w}{\rho_e \cdot l_g} \quad (4-24)$$

以上をまとめると、単粒ダイヤモンドが工作物を擦過する際の電解電流 I の変化は図4-24に示すようになる。露出した金属素地に新たに不働態化膜が生成されない場合には式(4-24)で表される一定の電解電流 I_p が流れ、以後に砥粒の擦過作用を受けても電流値は変化しないと考えられる。図4-22の電流波形が最大値に達した後急速に減少するのは、砥粒の擦過作用によって不働態化膜が除去された後、電解作用で新たな不働態化膜が生成されたことによると考えられる。

不働態化膜の生成過程においては第3章の3-3-3で述べたように、電解電流 I は投入電気量 q の増加につれて減少するはずであるので、この面からも単粒ダイヤモンドを用いて加工を行った場合の電解電流 I の減少が不働態化膜の生成によるものかどうかを検討した。単粒ダイヤモンドの擦過作用によって形成された擦過条痕の測定値とし

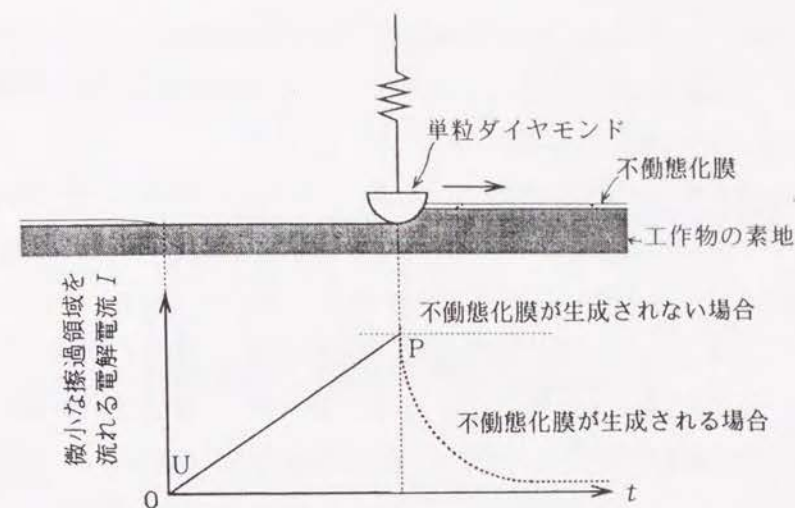


図4-24 砥粒の擦過作用と電解電流の変化の説明図

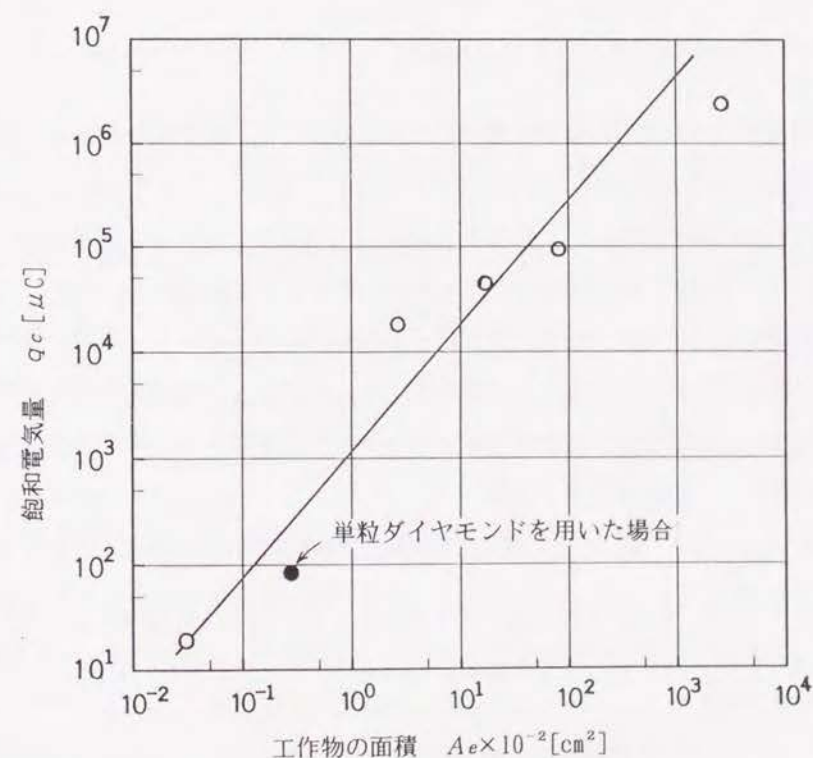


図4-25 工作物の面積と飽和電気量の関係
(JIS2種純Ti, 1%aq. NaNO₃, $l_g=3[\text{mm}]$, $V_g=10[\text{V}]$)

て、幅0.1[mm]、長さ3.5[mm]が得られたので、素地の露出面積 A_r は0.35[mm²]になる。
また図4-21の電流波形において、電流が最大になる時点からほぼ0になるまでの投入電気量 q を求めると約100[μC]となった。

この投入電気量 q が全て不動態化膜の生成に費やされている場合、電気量 q の値と擦過条痕による素地の露出面積 A_r の値は電解反応実験で得られた工作物の面積 A_e と飽和電気量 q_c の関係を表す直線上に載るはずである。

図4-25は図3-22の工作物の面積 A_e と飽和電気量 q_c の関係を表すグラフ(直線)に単粒ダイヤモンドを用いた場合の電気量 q と素地の露出面積 A_r の値をプロットしたものであるが、単粒ダイヤモンドを用いた場合の値は電解反応実験のものとはほぼ同じ線上にある。このことから電解電流 I の減少は不動態化膜の生成が原因していることが確かめられた。

4-4-2 バフ研磨材の擦過作用

(1) 工作物の送りがない場合の作用砥粒数

バフ研磨材を装着した回転円盤型の複合工具電極を用いて、送りがない状態の工作物($V_f=0$ の場合)を擦過する場合の作用砥粒数について考える。モデルとして図4-26に示す複合工具電極の回転中心から半径 R [mm]の位置にある工作物上の擦過領域を想定し、複合工具電極が回転する場合にこの領域を擦過する砥粒の数 M_s [個](以後、送りがない場合の作用砥粒数という)について考える。

擦過領域の幅を s [mm]とし、複合工具電極が回転数 N_R [rpm]で回転すると、この領域を単位時間 t [s]内に擦過するバフ研磨材の長さ L_r [mm]は

$$L_r = \frac{N_R \cdot 2 \cdot \pi \cdot R}{60} \cdot t \quad (4-25)$$

となる。バフ研磨材に加えられる荷重 F を一定とし、その時の砥粒密度を m_s [個/mm²]とすると、送りがない場合の作用砥粒数 M_s [個]は式(2-16)より

$$M_s = \frac{N_R \cdot 2 \cdot \pi \cdot R}{60} \cdot m_s \cdot s \cdot t \quad (4-26)$$

となる。式(4-26)より砥粒の平均擦過間隔 t_s [s]は

$$t_s = \frac{t}{M_s} = \frac{60}{N_R \cdot 2 \cdot \pi \cdot R \cdot m_s \cdot s} \quad (4-27)$$

となる。

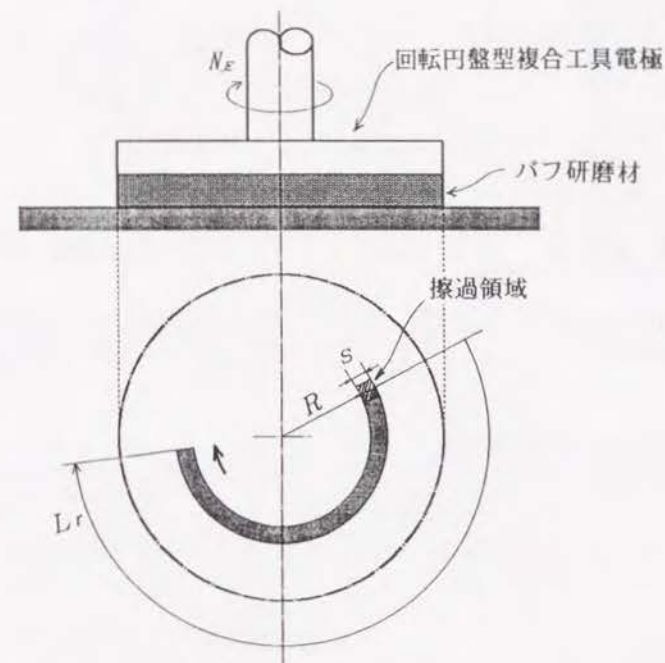


図4-26 バフ研磨材による擦過モデル

(2) バフ研磨材の擦過にともなう電解電流の変化

不動態化が生じる電解条件下にある工作物全体が多数の砥粒による擦過作用を受けると、単粒ダイヤモンドによる擦過作用を受けるときと同様に電解電流 I のパルス列が構成されるはずである。電解で発生するパルス列の数が工作物を擦過する作用砥粒数と等しいとすると、式(4-26)により送りがない場合の作用砥粒数 M_s は擦過領域の幅 s に比例する。この幅 s がバフ研磨材の砥粒の間隔に比べてはるかに大きい場合には、擦過領域に流れる電解電流 I は図4-27(a)に示すように1つ1つの砥粒の擦過で発生するパルス状の電解電流が重複されるので、1個の砥粒の擦過で発生するパルスを判別しにくくなる。逆に幅 s を砥粒の間隔程度に小さくすると、擦過領域に流れる電解電流 I は同図(b)に示すように1個の砥粒の擦過に対応して1つのパルスが発生する。

そこで擦過領域の幅 s をバフ研磨材の砥粒の間隔程度に小さくして加工中の電解電流 I を測定することとした。図4-28は直径0.2[mm]の小さな工作物を電解バフ複合加工

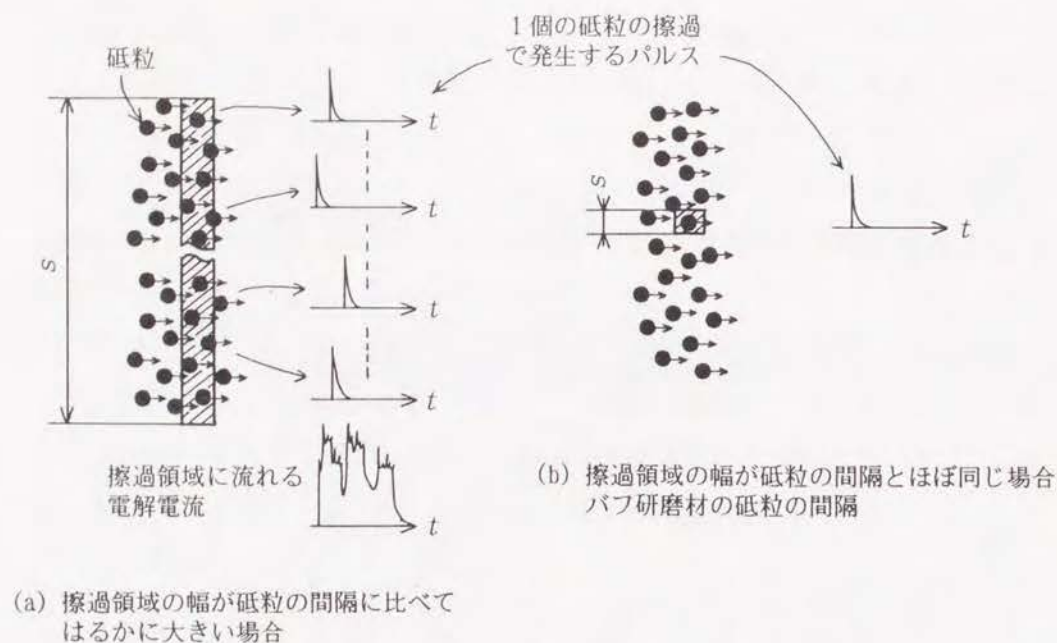


図4-27 擦過領域の幅とパルス状の電解電流の関係を表すモデル

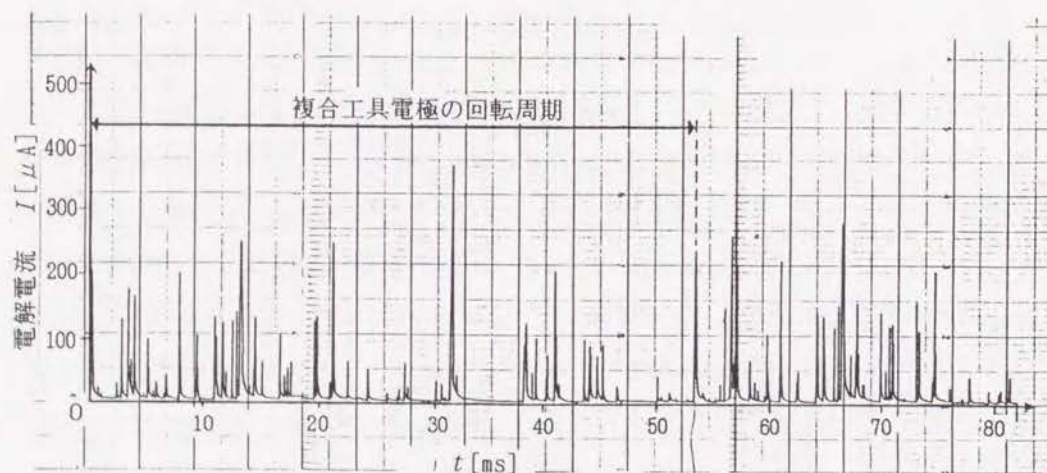


図4-28 微小な擦過領域に流れる電解電流
(JIS2種純Ti, 1%aq. NaNO₃, $l_g=3$ [mm],
 $V_g=10$ [V], $N_E=1050$ [rpm], #600バフ研磨材)

した場合に測定された電解電流 I を示す。これより幅の小さい工作物に流れる電解電流 I は断続的に出現する多数のパルス状の電解電流から成り立っていることが分かる。パルス列が現れる間隔は一定ではなく時間に対して不規則に変わっているが、平均値は図4-28の場合では約2[ms]である。この値は式(4-27)で表される砥粒の平均擦過間隔 t_m と対比すると、次の計算例に示すように砥粒の平均擦過間隔 t_m に近い値になっている。すなわち、複合工具電極の回転数 $N_E=1050$ [rpm]、擦過領域の幅 $s=0.2$ [mm]、複合工具電極中心からの半径 $R=20$ [mm]、砥粒密度 $m_\# = 1$ [個/mm²]とすると、式(4-27)より砥粒の平均擦過間隔 t_m は

$$t_m = \frac{60}{1050 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 20 \cdot 1 \cdot 0.2} = 2.3[\text{ms}]$$

となる。

またパルス列の間隔は複合工具電極の回転数 N_E によって変わり、回転数 N_E が増すほど間隔 t_m は短くなる。パルス列が複合工具電極の回転数 N_E に依存して生じていることは図4-28において、パルス列が複合工具電極の回転周期である約54[ms]の間隔で類似したパターンになっていることから分かる。

このようにバフ研磨材を用いた場合でも、工作物の表面では砥粒擦過による不働態化膜の除去と電解による不働態化膜の生成が繰り返されるので、電解で発生するパルス列の数が送りがない状態の工作物を擦過する作用砥粒数 $M_\#$ とほぼ等しいとみなすことができる。式(4-27)によると送りがない場合の作用砥粒数 $M_\#$ は複合工具電極の回転数 N_E 、砥粒密度 $m_\#$ に比例するはずである。

バフ研磨材の砥粒密度 $m_\#$ は第2章の2-3-1で述べたようにバフ研磨材に加える荷重 F によって変わるので、まず荷重を変えた場合(電解ギャップ l_g も変化する)の送りがない場合の作用砥粒数 $M_\#$ を調べた。その結果を図4-29に示す。単位面積あたりの荷重 P_F が減少すると砥粒密度 $m_\#$ が低くなるために送りがない場合の作用砥粒数 $M_\#$ は減少することが分かる。

また複合工具電極の回転数 N_E の影響については図4-30に示すように、送りがない場合の作用砥粒数 $M_\#$ は単位面積あたりの荷重 P_F が1.2[kgf/cm²]以上では回転数 N_E の増大につれて増加した。しかし1[kgf/cm²]以下の荷重では400~600[rpm]の回転数で送りがない場合の作用砥粒数 $M_\#$ は最大になり、回転数 N_E をそれ以上増大すると減少

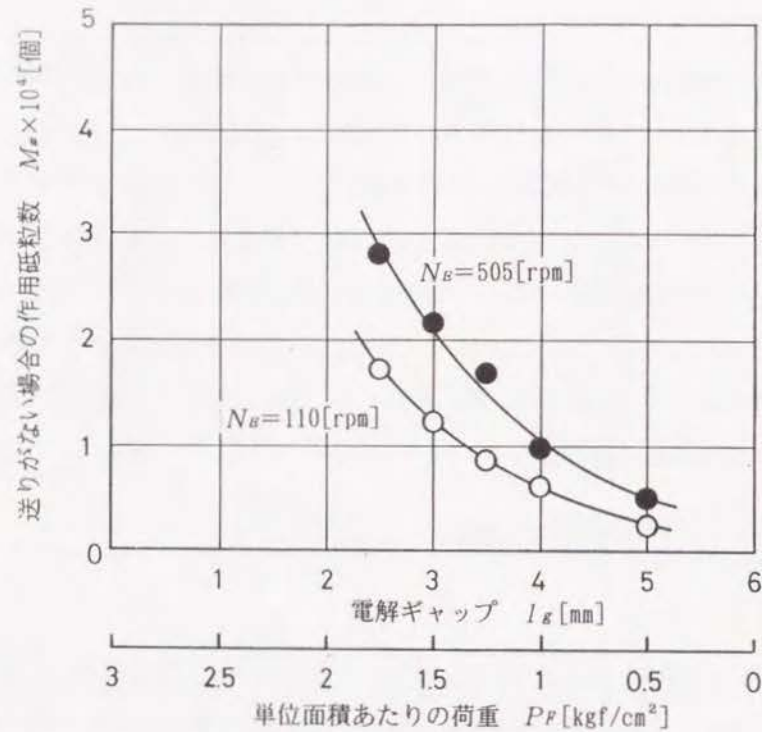


図4-29 パフ研磨材に加えた単位面積あたりの荷重、
電解ギャップと送りがない場合の作用砥粒数の関係
(JIS2種純Ti, 1%aq. NaNO₃, $l_g=3$ [mm],
 $V_g=10$ [V], #600パフ研磨材)

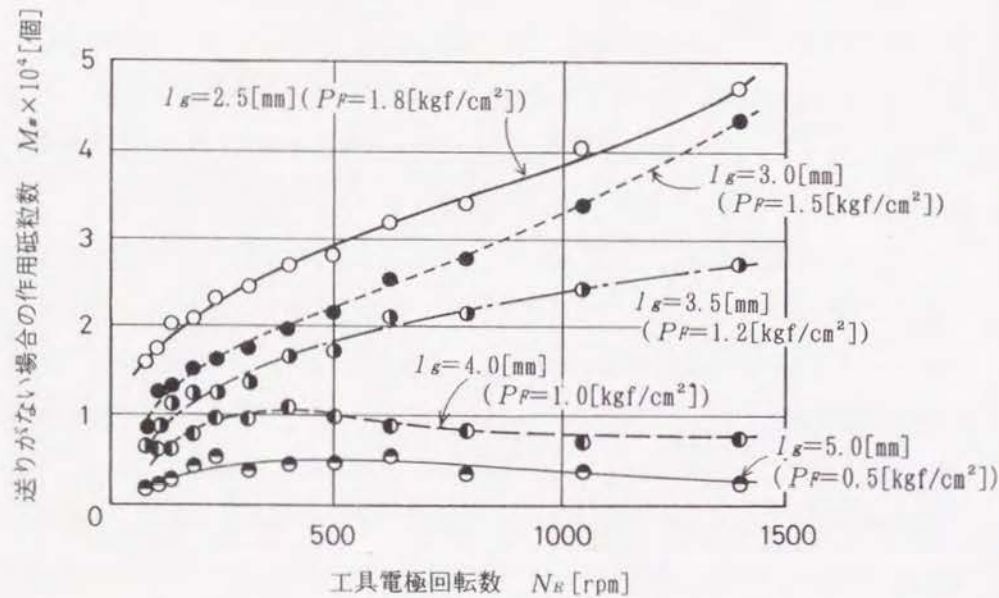
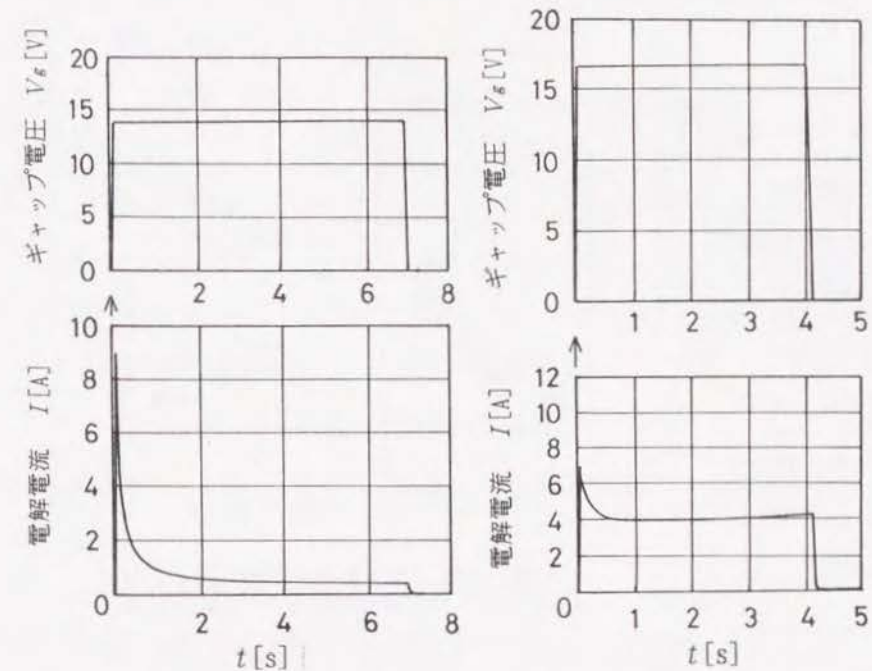


図4-30 工具電極の回転数と送りがない場合の作用砥粒数の関係
(JIS2種純Ti, 1%aq. NaNO₃, $l_g=3$ [mm],
 $V_g=10$ [V], #600パフ研磨材, 測定時間 30[s])

した。小さい荷重で加工を行った場合に送りがない場合の作用砥粒数 M_a が減少するのは、複合工具電極の回転数 N_R が増加することによって砥粒の擦過速度 V_t が増して、動圧によってパフ研磨材が浮き上がったためと思われる³⁹⁾。

4-4-3 電解パフ複合加工における電解電流

電解作用を受けている工作物をパフ研磨材で擦過する場合としない場合について、測定された電解電流 I を比較したところ図4-31のようになった。同図(a)はパフ研磨材で擦過しない場合（電解加工）の電解電流 I を示しているが、電解電流 I は不動態化膜が生成されるためにギャップ電圧 V_g を印加した直後に急増し、以後急速に減少して電流の最大値と定常値の差がかなり大きい。パフ研磨材で擦過した場合（電解パフ複合加工の場合）の電解電流 I は同図(b)に示すようにギャップ電圧 V_g を印加した直後に若干減少したが、最大値と定常値の差は電解加工の場合に比べるとずっと小さい。



(a) 電解加工における電解電流の時間変化
(JIS2種純Ti, $A_e=28.8$ [cm²], 1%aq. NaNO₃, $l_g=3$ [mm])
(b) 電解パフ複合加工における電解電流の時間変化
(JIS2種純Ti, $A_e=28.8$ [cm²], 1%aq. NaNO₃, $l_g=3$ [mm],
 $N_R=1050$ [rpm], #600パフ研磨材)

図4-31 電解加工と電解パフ複合加工の電解電流変化の比較

図4-32はギャップ電圧 V_g と最大電流 I_p 、定常電流 I_s の関係を、電解加工の場合と電解パフ複合加工の場合について比較したものである。最大電流 I_p は電解加工、電解パフ複合加工のいずれの場合もギャップ電圧 V_g を印加した直後に測定されたものである。

電解パフ複合加工の最大電流 I_p が電解加工のものに比べて小さいのは、工作物と複合工具電極の間に絶縁性のパフ研磨材が介在するためにギャップ抵抗 R_g が高くなったためと思われる。一方、定常電流 I_s の値は電解パフ複合加工の場合の方が大きくなった。

また電解電流 I は砥粒の大きさによっても異なる。図4-33はパフ研磨材の砥粒の粒度を変えて電解パフ複合加工を行った場合に測定されたギャップ電圧 V_g と定常電流 I_s 、最大電流 I_p の関係を示す。粒径の大きい粒度#320のパフ研磨材を用いた場合の方が、粒径の小さい粒度#2500の場合よりも定常電流 I_s の値が大きい。

以上の結果に基づいて複合工具電極に流入する電解電流 I と工作物上の微小な擦過領域を流れるパルス電流の関係について検討する。パフ研磨材を装着した回転円盤型の複

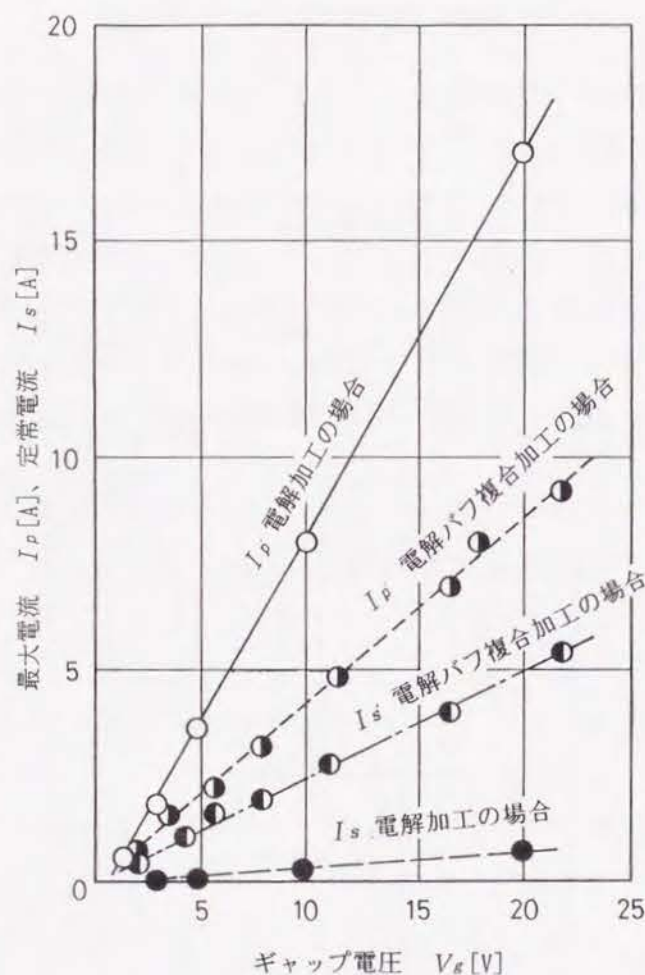


図4-32 最大電流と定常電流の比較
(JIS2種純Ti, $A_e=28.8[\text{cm}^2]$, 1%aq. NaNO_3 ,
 $l_g=3[\text{mm}]$, $N_R=1050[\text{rpm}]$, #320パフ研磨材)

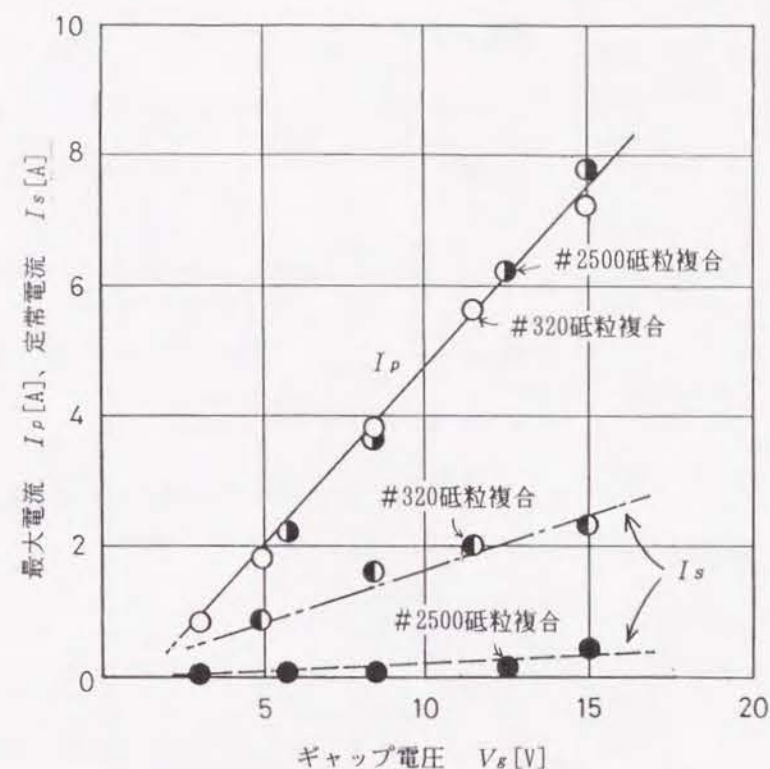


図4-33 砥粒の粒度の影響
(JIS2種純Ti, $A_e=28.8[\text{cm}^2]$, 1%aq. NaNO_3 ,
 $l_g=3[\text{mm}]$, $N_R=1050[\text{rpm}]$)

合工具電極によって工作物が T [s] 間加工される場合、複合工具電極面下の工作物が受ける作用砥粒の総数は、複合工具電極全面 S_E の作用砥粒数 $M_{\#T}$ [個] が微小な擦過領域での作用砥粒数 $M_{\#}$ の総和として表されたと考えて

$$M_{\#T} = \sum_{S_E} M_{\#} \quad (4-28)$$

で表される。ここに $M_{\#}$ は式(4-26)で定義された微小な擦過領域における作用砥粒数である。

微小な擦過領域に流入するパルス電流は近似的に電流のピーク値 I_p [A] が式(4-24)で表される値の矩形波で近似でき、パルス幅はピーク値とは無関係に Δt_i [s] で一定とし、1個の砥粒が通過する毎に $I_p \cdot \Delta t_i$ [C] の電気量が投入されると仮定する。

T [s] 間の電解パフ複合加工によって工作物に投入される総電気量 q_T [C] は、1個のパルスで投入される電気量 $I_p \cdot \Delta t_i$ と工作物を受ける作用砥粒の総数 $M_{\#T}$ の積で表されるから

$$Q_T = I_p \cdot \Delta t_i \cdot M_{\#T} \quad (4-29)$$

となる。従って T [s]間に複合工具電極に流入する電解電流の平均値 I_T [A]は

$$I_T = \frac{I_p \cdot \Delta t_i \cdot M_{\#T}}{T} \quad (4-30)$$

となる。式 (4-30) に式 (4-29)、式 (4-24)、式 (4-26) を代入すると

$$I_T = \frac{V_g \cdot S_r \cdot D_w}{\rho_e \cdot l_g} \cdot \frac{\Delta t_i}{T} \sum_{S_E} \left(\frac{N_E \cdot 2 \cdot \pi \cdot R}{60} \cdot m_{\#} \cdot S \cdot T \right) \quad (4-31)$$

が得られる。

また式 (4-31) において Δt_i と \sum の項の積はパルス列の時間幅の総和を表している
るので、この時間 T_p [s]を

$$T_p = \Delta t_i \cdot \sum_{S_E} \left(\frac{N_E \cdot 2 \cdot \pi \cdot R}{60} \cdot m_{\#} \cdot S \cdot T \right) \quad (4-32)$$

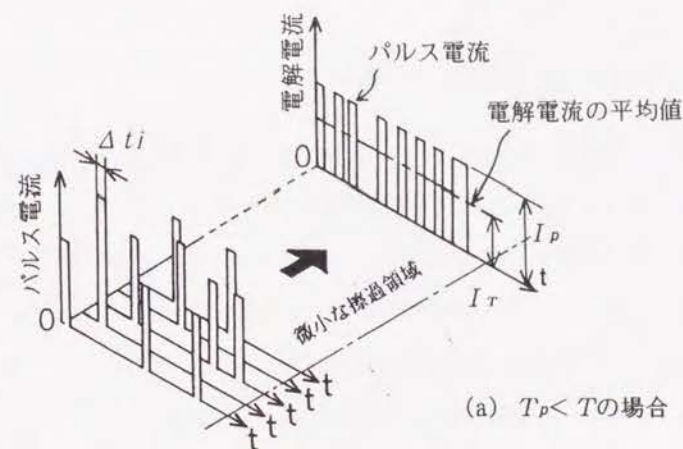
とおいて、式 (4-32) を式 (4-31) に代入すると

$$I_T = \frac{V_g \cdot S_r \cdot D_w}{\rho_e \cdot l_g} \cdot \frac{T_p}{T} \quad (4-33)$$

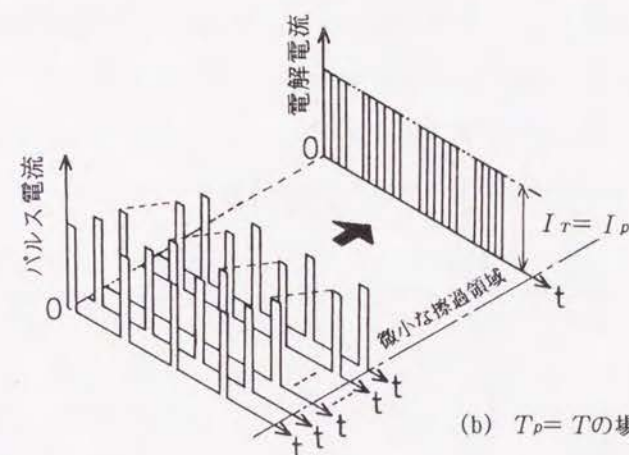
が得られる。式 (4-33) から電解電流 I の平均値 I_T は、加工時間 T とパルス列の時間幅 T_p の大小関係によって次のように異なることが分かる。すなわち

- 1) $T_p < T$ の場合：休止時間を有するパルス電流が加工中に生じることにより、電解電流の平均値 I_T は1個の砥粒擦過によるパルス電流のピーク値 I_p より値が小さくなるかあるいは脈流になる (図4-34(a)参照)。
- 2) $T_p = T$ の場合：パルス列の時間の総和 T_p と加工時間 T が一致し、電解電流の平均値 I_T は1個の砥粒擦過によるパルス電流のピーク値 I_p と等しい値の直流になる (図4-34(b)参照)。
- 3) $T_p > T$ の場合：パルス列の時間の総和 T_p が加工時間 T を上回り、パルス列同士が重なり合う。そのため電解電流の平均値 I_T は1個の砥粒擦過によるパルス電流のピーク値 I_p より値が大きくなる (図4-34(c)参照)。

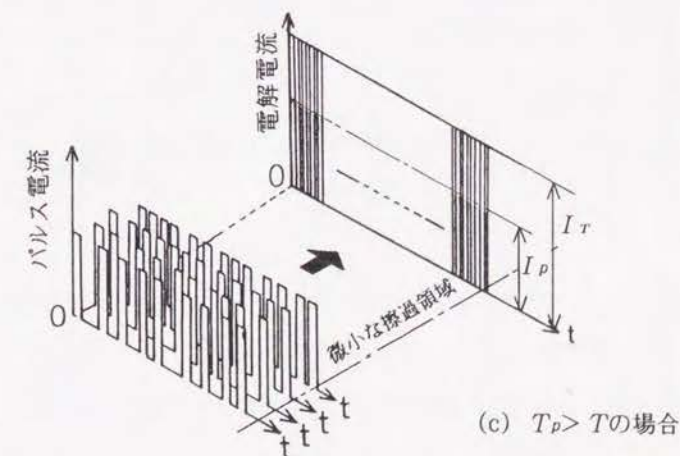
従って図4-31(b)において電解パフ複合加工の電解電流 I がパルス状でなく、ほぼ直流になったのは $T_p \geq T$ の関係にあったためと思われる。



(a) $T_p < T$ の場合



(b) $T_p = T$ の場合



(c) $T_p > T$ の場合

図4-34 パルス電流と電解電流の関係

4-4-4 電解パフ複合加工の加工能率

同一の電解条件で電解パフ複合加工を行った場合と電解加工を行った場合の材料除去率 w を比較して図4-35に示す。電解加工の場合、ギャップ電圧 $V_g = 25$ [V]以下ではTiが不働態化し陽極溶出が生じないので、材料除去率 w はほぼ0になる。電解パフ複合加工の材料除去率 w は、パフ研磨材のみによる値（ギャップ電圧 $V_g = 0$ [V]の場合、10 [mg/min]程度）からギャップ電圧 V_g の増加とともに増大し、Tiが不働態化する電解条件であるにもかかわらず除去作用が抑制されることはない。

図4-35の横軸のギャップ電圧 V_g の代りに、同時に測定された電解電流 I を用いて表すと図4-36のようになる。材料除去率 w は電解電流 I に比例して増加しているので、電解パフ複合加工においても陽極溶出が生じていることが分かる。これは砥粒の擦過作用で素地が露出した部分に流入する電解電流 I が、ギャップ電圧 V_g の増加によって増大し、陽極溶出による除去作用が高まるためである。

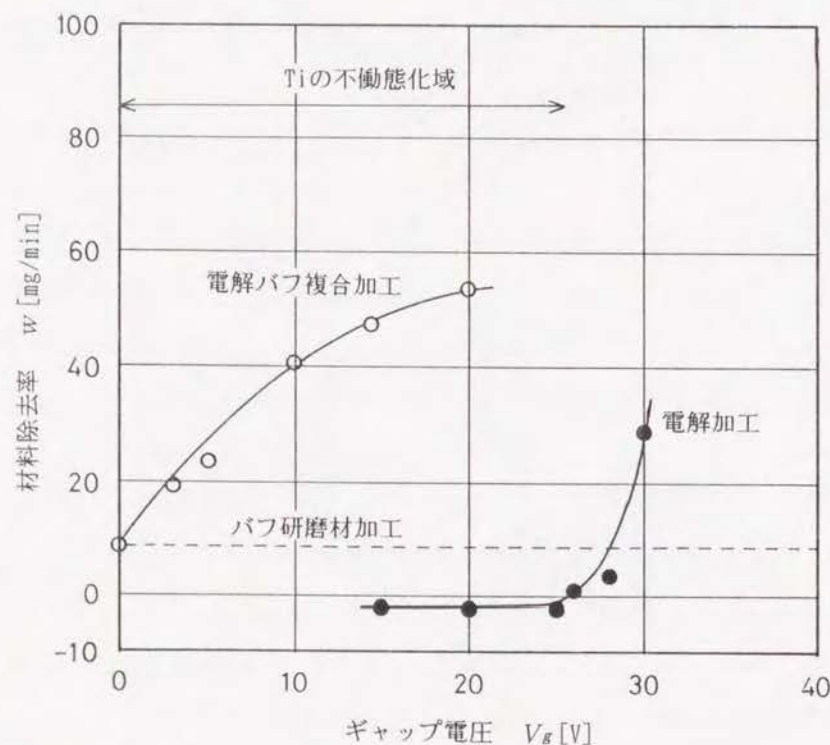


図4-35 ギャップ電圧と材料除去率の関係の比較
(JIS2種純Ti, $A_e = 28.8$ [cm²], 1%aq. NaNO₃, $t = 30$ [s]
 $I_g = 3$ [mm], $N_g = 1050$ [rpm], #320パフ研磨材)

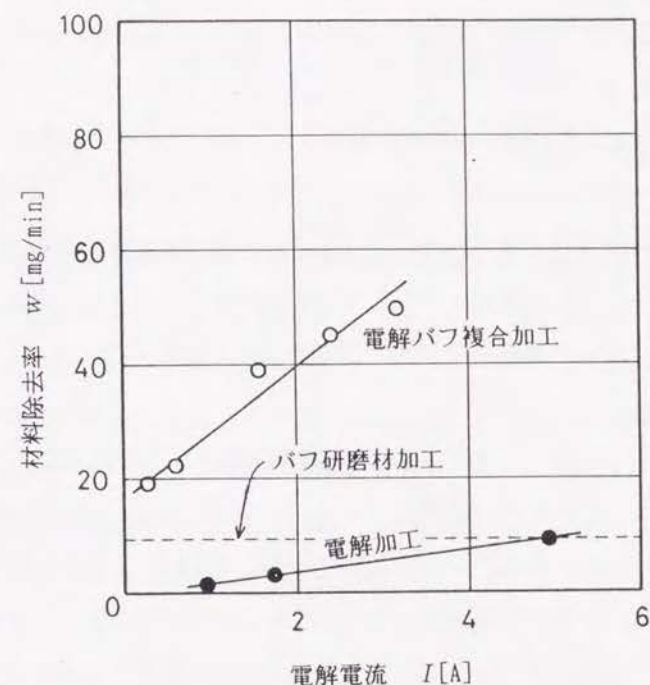


図4-36 電解電流と材料除去率の関係
(JIS2種純Ti, $A_e = 28.8$ [cm²], 1%aq. NaNO₃,
 $I_g = 3$ [mm], $N_g = 1050$ [rpm], #320パフ研磨材)

4-5 結論

不働態化が生じる電解条件下において工作物が砥粒で擦過される場合、不働態化膜の除去と生成が繰り返されるかどうかを調べるために、単粒ダイヤモンドを用いた加工実験ならびに、パフ研磨材の砥粒の間隔程度に幅を小さくした工作物を流れる電解電流 I の測定実験を行い、電解と砥粒擦過による複合除去作用について検討した。その結果以下のことが明らかになった。

- (1) Tiのように電解液の抵抗に比べてかなり大きな抵抗をもつ不働態化膜が生成する工作物を、電解しながら砥粒で擦過すると、不働態化膜が除去されて素地が露出し、そこを流れる電解電流 I が増大する。しかし砥粒が擦過した後、再び不働態化膜が速やかに生成されるので電解電流 I は急速に減少する。
- (2) 回転円盤型複合工具電極と工作物の相対運動によって工作物に形成される砥粒の擦過軌跡は、Y軸方向の軌跡の間隔 ΔY が複合工具電極中心からの距離 y によ

って変わり、中心から離れるほど間隔が小さくなる。なおX軸方向の軌跡の間隔 ΔX はどこでも一定である。

- (3) 工作物上の微小な擦過領域を回転円盤型複合工具電極が通過する場合、この擦過領域は複合工具電極の中心に対する半径 r が異なる多数の砥粒で擦過される。半径 r の複合工具電極の回転角 θ に対する減小の割合は、複合工具電極中心からの距離 y によって変わる。そのため作用砥粒数 $M_{\theta y}$ が変化し、最も作用砥粒数 $M_{\theta y}$ が大きくなるのは距離 y が複合工具電極の半径 R_B に対して約57%の位置である。
- (4) 電解パフ複合加工される工作物の微小な擦過領域では、不働態化膜の除去と生成が繰り返されてそこを流れる電解電流 I はパルス状になる。したがって1個の砥粒が通過するたびに1個のパルスが生じる。回転円盤型の複合工具電極に流入する電解電流 I は、1個の砥粒擦過で生じるパルス状の電解電流 I の累積で構成される。ただし電流の大きさは加工時間 T とパルス列の時間幅の総和 T_p の大小関係によって変化する。
- (5) 電解パフ複合加工による工作物の材料除去率 w は、工作物が不働態化するギャップ電圧 V_g を印加しているにもかかわらず、電解電流 I に比例して増大する。これは砥粒の擦過作用で不働態化膜が除去されて工作物の素地が露出し、そこに電解電流 I が集中して陽極溶出が生じるためである。

第5章 ステンレス鋼の鏡面加工

5-1 緒 論

ステンレス鋼の特徴は炭素鋼程度の機械的強度を持ち、かつ化学的な耐食性においてはるかに優れていることである。現在、ステンレス鋼は構造材料、装飾用品、医療器具、家庭用品など広い用途に用いられている。

ステンレス鋼が錆びにくいのは表面に化学的に安定な不働態化膜が生成されるためであり、高温の化学反応を伴う特殊な環境を除いて、通常的环境下で腐食することはない。そのためステンレス鋼は素材のままで使用されることが多く、表面の美観がしばしば要求される。とくに装飾用品や医療器具、家庭用品に用いられるステンレス鋼は鏡面に仕上げられることが多い。

また最近では、単に表面の美観をよくするだけでなく、表面の凹凸を極力小さくすることによる物理的な効果を積極的に利用する用途が拡大している。その1つはステンレス鋼の薄板を機能性薄膜の基板に用いるものである。a-Si太陽電池を製作する際には膜厚約100[nm]のa-Siの薄膜を均一に形成させるために鏡面加工された基板が必要とされる⁴⁰⁾。他の1つは表面を滑らかにして実質の表面積を小さくするものである。たとえば機能性薄膜を作製する際に用いられる真空チャンバ、反应用ガスの配管系にはステンレス鋼が用いられるが、真空度を高めようとするとステンレス鋼からの脱ガスが問題になる⁴¹⁾。単位面積あたりの材料から放出されるガスの量が一定である場合には、材料の表面積が小さいほど脱ガス量は減少する。

以上の用途からも分かるように、ステンレス鋼でできた部品の形状は平板、円筒もしくは複雑な曲面のことが多い。これらの部品を加工する際の加工精度は表面粗さが重視され、形状精度、寸法精度はあまり問われないことが多い。そのためステンレス鋼の研磨加工は従来から広く行われている。平板や複雑な曲面の研磨加工はパフ研磨材加工やバレル研磨加工の機械的な加工法で行われる。また円筒の内面のように機械的な加工を行いきにくい部分の研磨加工には物理・化学的な除去加工として電解加工が行われることもある。

ところがこれらの方法には問題点も多い。パフ研磨材加工の問題点は作業者の個人差が生じやすいことと加工能率が低いことである。電解加工の問題点は表面粗さが電解液

の温度、導電率、PHなどに影響されやすいこと、および広い面積の工作物を研磨する際には電解ギャップの長さを適切に設定しなければならないことである。

電解バフ複合加工によってステンレス鋼の鏡面加工を行おうとする目的は、上述のバフ研磨材加工と電解加工の問題点を改善して、さまざまな形状の工作物の鏡面加工を高い加工能率で行おうとするものである。しかしその際に問題になるのはステンレス鋼の不動態化膜の生成を電気化学的に制御し得るかどうかである。ステンレス鋼のように耐食性に優れた材料は、空気中に短時間置かれただけで表面に不動態化膜が生成される。ステンレス鋼の不動態化膜が電解作用の有無に関わらず生成されるものならば、工作物が砥粒で擦過除去された直後に不動態化膜が生成されて、電解による陽極溶出が生じなくなることも考えられる。この場合には、砥粒の擦過作用によって鏡面加工は行えるが、加工能率はバフ研磨材加工のものとはほぼ同程度になり、大幅な加工能率の向上は期待できない。

そこで本章ではまずステンレス鋼の不動態化膜の特徴について検討を行なった上で、電解バフ複合加工法を用いてステンレス鋼の加工実験を行い、加工能率と品質を調べることにした。さらに電解バフ複合加工によるステンレス鋼の鏡面加工の実施例について述べる。

本章の構成は次のようになっている。5-2節ではステンレス鋼の不動態化膜の特徴について述べる。5-3節はステンレス鋼の鏡面加工を行うための実験装置と方法であり、5-4節は実験結果と考察である。さらに5-5節は電解バフ複合加工によるステンレス鋼の鏡面加工の実施例について述べる。5-6節は以上をまとめた結論である。

5-2 ステンレス鋼の不動態化膜の特徴

ステンレス鋼の成分元素であるFe, Ni, Crはいずれもイオン化傾向がHよりも大きい卑な金属であるので酸化されやすい。ステンレス鋼の不動態化膜はこれらの元素が酸化されてできた薄膜からなるものと思われる。前述のようにステンレス鋼の不動態化は空気中においても生じるといわれている^{4,2)}。エメリーペーパーで研磨したステンレス鋼を数時間放置した後表面の分析を行うと、表面には主としてFeの酸化物の薄膜が生成されている。しかしこのようにして生成された不動態化膜の膜厚 h_w は数[nm]程度であり、耐

食性に劣る。

耐食性に優れた不動態化膜を工業的に生成するために一般に酸性液が用いられている^{4,3)}。不動態化は酸性液中にステンレス鋼を浸せきして行われ、酸化を促進するために加熱処理あるいは陽極酸化が併用される。加熱処理は酸性液を50~60[°C]に加熱し、その中にステンレス鋼を数10[min]浸せきして行われる。この方法はステンレス鋼を生産する製鋼所において、製鋼ラインの最終段階で用いられている。一方、陽極酸化は酸性液中でステンレス鋼を陽極として直流電解して行われる。なお陽極酸化は通常、電解電流 I を一定(定電流電解という)にして行われ、通電時間で投入する電気量 q を制御している。このことから陽極酸化の場合、不動態化膜は電気量 q に比例して生成されるものと思われる。

次に不動態化膜の性質については、加熱処理、陽極酸化いずれの方法によった場合にも生成される不動態化膜は無色透明で、膜厚 h_w は数10[nm]程度である。しかし耐食性については陽極酸化によって生成されたものの方がCrの酸化物の薄膜が生じやすいため、加熱処理で生成されたものより優れている^{4,4)}。

電解液に酸素酸塩型のものを用いた場合には、電解によって O_2 が生じるために不動態化は酸性液を用いた場合に比べて生じやすい。図5-1は20%の $NaNO_3$ 水溶液中でステンレス鋼SUS304を陽極に、Cuを陰極にして対向させて直流電解を行った場合のギャップ電圧 V_g に対する陽極溶出による材料除去率 w の測定結果である。

ステンレス鋼SUS304はギャップ電圧 $V_g=3$ [V]以下で不動態化し、不動態化域では電解電流 I が減少した。加工後のステンレス鋼の表面の外観は加工前と変わらず腐食も生じなかったので、電解液として $NaNO_3$ 水溶液のような酸素

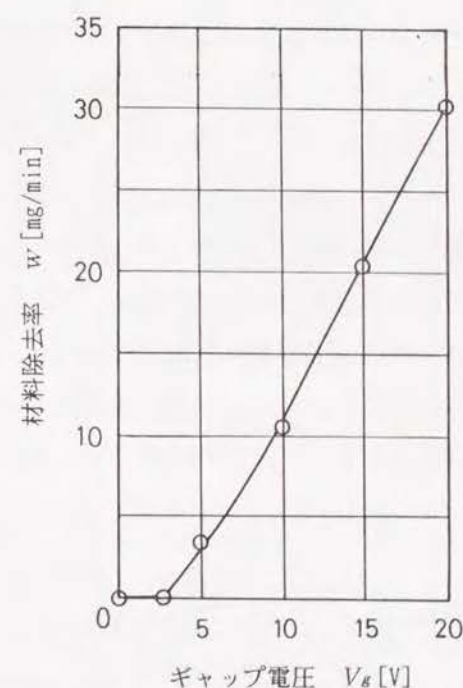


図5-1 ステンレス鋼を電解した場合のギャップ電圧と材料除去率の関係 (SUS304, $A_e=1$ [cm²], 20%aq. $NaNO_3$, $I_g=3$ [mm])

酸塩型のものを用いた場合にもステンレス鋼は不働態化することが分かった。

このようにステンレス鋼は不働態化しやすい金属ではあるが、不働態化膜の膜厚 h_w がかなり小さいので、不働態化膜の抵抗 R_p が小さく電解電流 I が流れやすい。電解バフ複合加工においては、電解電流 I は砥粒の擦過作用で素地が露出した部分に流入するが、表面に不働態化膜の膜厚 h_w が小さい部分があるとこの部分にも電解電流 I が流れる。この場合、陽極溶出は両方で生じるが、膜厚 h_w の小さいところが多いと、工作物の表面は過不働態化域で加工したような荒れた面になる。したがってステンレス鋼を加工する際には、ギャップ電圧 V_g をなるべく小さく抑制する必要がある。

5-3 実験装置と方法

実験装置として第3、4章で使用した回転円盤型の複合工具電極を用いて平面加工を行った場合と同様に、第3章の図3-1に示したNCフライス盤に搭載したものをを用いる。工作物としては冷間圧延ステンレス鋼SUS304とSUS316を用いる。

ステンレス鋼SUS316を電解加工、バフ研磨材加工および電解バフ複合加工と加工原理の異なる3つの加工法で加工した場合に、材料除去率 w と表面粗さがどの程度違うかを調べることにした。電解加工を行う場合には、電解液にステンレス鋼の電解加工液としてよく用いられている H_2PO_4 と H_2SO_4 の混合液を用いる。電解加工は工作物とバフ研磨材を装着しない複合工具電極を電解液中で対向させ、直流電圧を印加して行う。

電解バフ複合加工を行う場合には、電解液は10%ないし20%の $NaNO_3$ 水溶液を用い、研磨材は Al_2O_3 の砥粒が固着したバフ研磨材を用いる。加工は複合工具電極を回転させながらバフ研磨材を工作物に押付け、NCフライス盤の加工テーブルをX軸方向に一定速度で往復運動させて行う。電解液は複合工具電極の中空穴から供給して、複合工具電極を一極に、工作物を+極にして直流電圧を印加する。このようにして加工すると、工作物は図5-2のハッチされた部分に加工痕が生じる。なおバフ研磨材加工は電解バフ複合加工と同様な方法で行うが、直流電圧は印加しない。

次に、砥粒の粒径 d_a を小さくすると、表面粗さはどの程度まで小さくなるかを調べる。砥粒の粒径 d_a を変えるには粒度の異なるバフ研磨材を用いればよいが、使用したバフ研磨材はあまり細かい砥粒を固着したものは生産されていない。そこで粒径の小さい砥粒を用いた加工は遊離砥粒を用いた電解バフ複合加工で行うこととした。

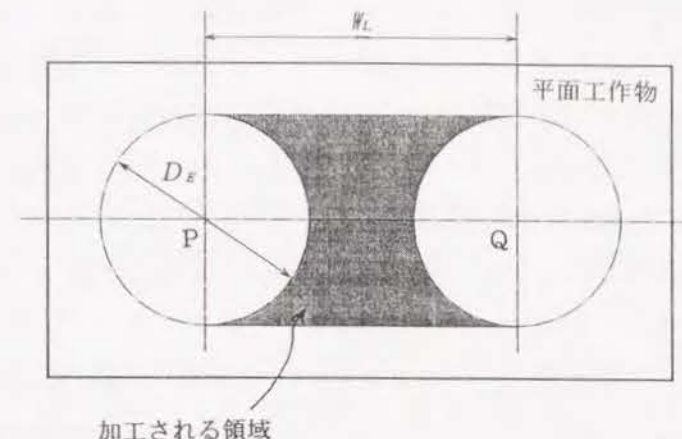


図5-2 平面工作物の加工領域

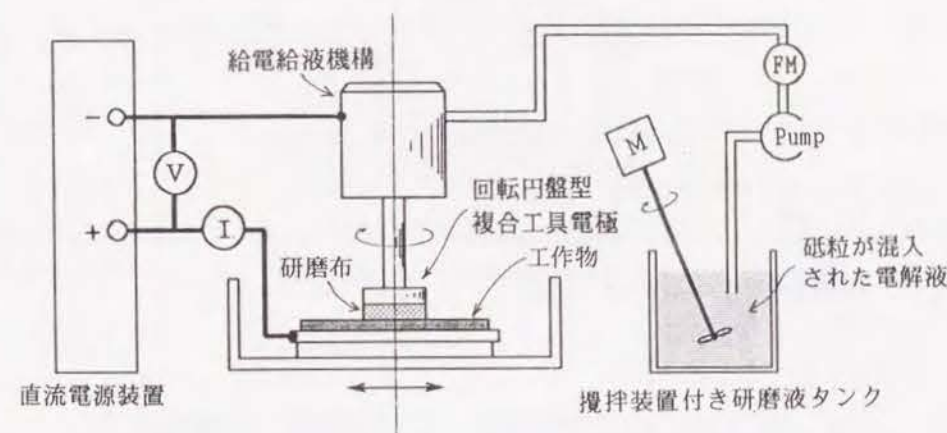


図5-3 遊離砥粒を用いた電解バフ複合加工実験装置

遊離砥粒を用いた電解バフ複合加工実験には、図5-3に示すように電解液中に微細な砥粒を混入し、複合工具電極にはバフ研磨材に替えて砥粒の固着されていないポリッシング用の研磨布を複合工具電極の下面に装着したものをを用いる。工作物として冷間圧延ステンレス鋼SUS304を用い、複合工具電極と工作物の運動方式、直流電源の接続は前述の平面工作物を加工する場合と同じである。

以上の実験において表面粗さは触針式の表面粗さ計で測定し、材料除去率 w は加工前後の工作物の重量を精密天秤で測定して得た重量差と加工時間 t から求める。

さらに電解バフ複合加工で加工された工作物の形状精度を調べる。回転円盤型の複合工具電極で平面工作物を加工した場合、第4章の4-2-1で述べたように、工作物に形成される擦過条痕のY軸方向の間隔 ΔY と作用砥粒数 $M_{\#y}$ は複合工具電極の中心からの距離 y によって異なる。これらが工作物の形状精度に及ぼす影響を調べるために、図5-4に示す方法でY軸方向について工作物の除去深さ hz を測定する。すなわち、任意の距離 y の除去深さ hz は加工前の工作物の厚み $hz0$ と加工後の厚み $hz1$ を測定して、その差 $hz0 - hz1$ を除去深さ hz として定義した。

製作した除去深さ hz の測定機を図5-5に示す。この測定機は2個の精密電気マイクロメータ (Fein Pruf 社製12021C) と精密X軸ステージで構成され、電気マイクロメータの出力を加算演算して厚みを測定する。

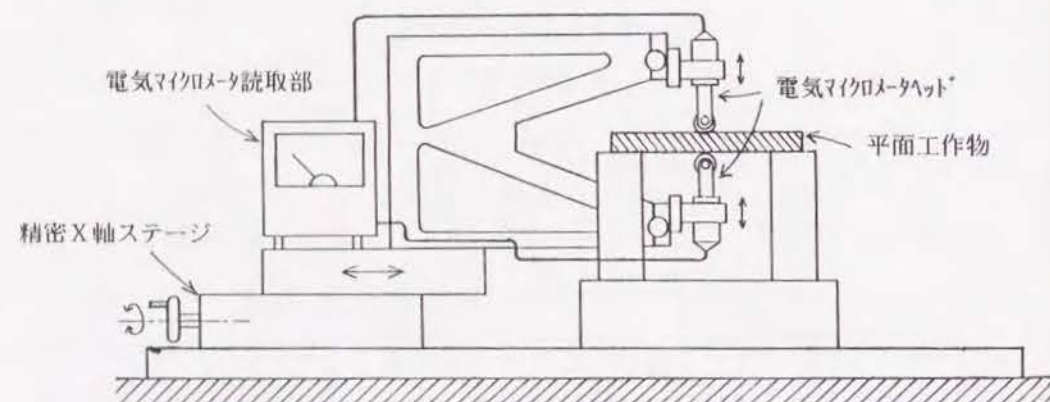


図5-4 除去深さ hz の測定方法

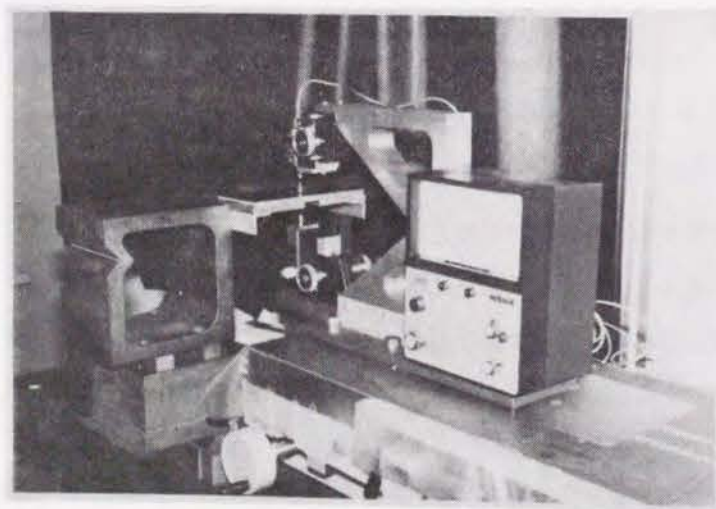


図5-5 除去深さ hz の測定機の外観

5-4 実験結果と考察

5-4-1 電解バフ複合加工の加工性能

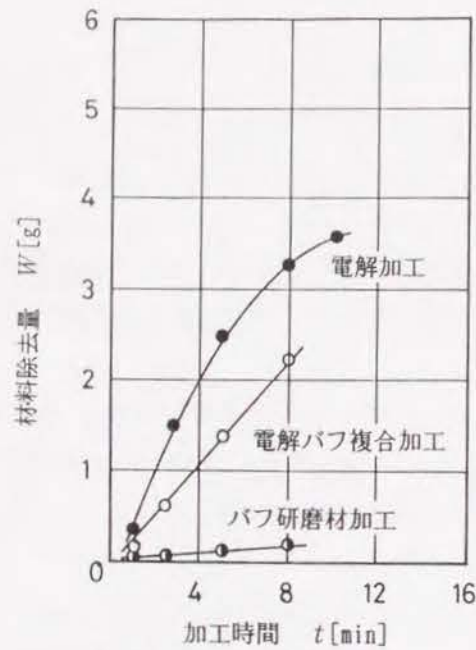
ステンレス鋼SUS316を電解加工、バフ研磨材加工および電解バフ複合加工によって加工した場合について、測定された表面粗さ、材料除去量 W と加工時間 t の関係を図5-6に示す。

まず電解加工を行った場合、工作物の材料除去量 W は図5-6(a)に示すように、加工開始直後は加工時間 t に対する材料除去量 W の増加の割合が大きいが、ある程度時間が経過すると材料除去量 W の増加の割合は小さくなった。これを材料除去率 w でみると、加工開始から $t=4$ [min]までは $w=500$ [mg/min]であるが、 $t=8$ [min]経過すると $w=150$ [mg/min]まで小さくなる。一方、表面粗さは同図(b)のように、加工時間 $t=1$ [min]前後まで表面粗さの減少の割合は大きい、材料除去量 W の増加の割合が減少するのにともなって表面粗さの減少の割合も小さくなり、さらに加工を継続しても $R_{\max} 3$ [μm]以下にはならなかった。

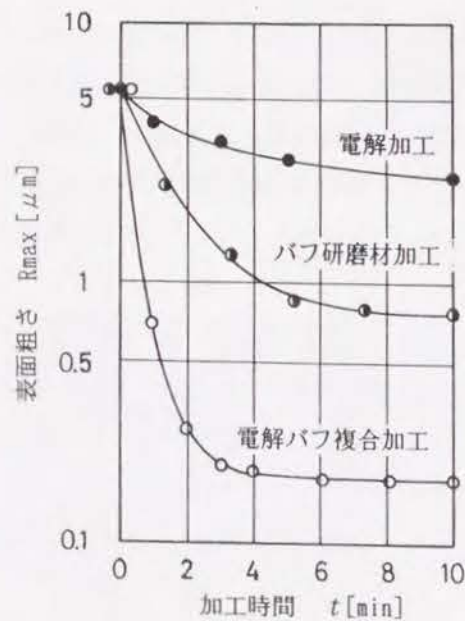
電解液として H_3PO_4 と H_2SO_4 の混合液を用いると、不働態化膜が生成されにくいために、工作物の平滑化は凸部への電解電流 I の集中による局所的な溶出によって行われる。加工開始直後に加工時間 t に対する材料除去量 W の増加の割合が大きく、表面粗さが急激に良くなったのは、下地の凸部が優先的に除去されるためである。加工が進んで表面がある程度滑らかになると、凹凸の差が小さくなって凸部に電解電流 I が集中されない、表面粗さはあまり減少しなくなる。表面に凹凸がある場合に、凸部に集中する電解電流 I がその他の部分に比べて有為な差を保つには、凹凸の量が2 [μm]程度は必要であることが木本らによって明らかにされている¹³⁾。

バフ研磨材加工を行った場合、材料除去量 W は第2章の2-3-2で述べた理由により電解加工に比べてかなり小さいが、砥粒の擦過で常に素地が除去されるので、材料除去量 W は加工時間 t に比例して増大し、材料除去率 w は約25 [mg/min]の一定値になった。表面粗さは電解加工に比べて良くなり、加工時間 $t=5$ [min]で $R_{\max} 0.8$ [μm]になった。

電解バフ複合加工の場合には、陽極溶出が生じない不働態化のギャップ電圧 V_g を印加しているにもかかわらず、材料除去量 W は加工時間 t に比例して増大した。電解バフ複合加工においては、工作物の除去は後述するように、陽極溶出が砥粒の擦過作用で不働態化膜が除去されたところでのみ生じるので、材料除去量 W は電解加工に比べて



(a) 材料除去量の時間変化
(SUS316, $A_e=28.8[\text{cm}^2]$, $l_s=3[\text{mm}]$,
 $N_B=1050[\text{rpm}]$, #320バフ研磨材)



(b) 表面粗さの時間変化
(SUS316, $A_e=28.8[\text{cm}^2]$, $l_s=3[\text{mm}]$,
 $N_B=1050[\text{rpm}]$, #320バフ研磨材)

図5-6 種々の方法によって加工された工作物の材料除去量と表面粗さの関係
電解液 電解加工の時
 H_3PO_4 と H_2SO_4 の混合液 混合比6:4
電解バフ複合加工の時
20%aq. NaNO_3

やや小さくなったが、バフ研磨材加工よりはるかに大きくなった。なお電解バフ複合加工の材料除去率 w は約250[mg/min]になった。また表面粗さ R_{max} は加工時間 t の経過とともに著しく減小し、加工時間 $t=3$ [min]で $R_{\text{max}} 0.2[\mu\text{m}]$ と、3つの加工法の中では最も良くなった。

以上の実験結果に基づいて電解バフ複合加工における工作物の除去作用を考察する。電解バフ複合加工の材料除去率 w はバフ研磨材加工に比べてかなり大きいので、加工中に陽極溶出が生じたことは確かである。陽極溶出が工作物のどの部分で生じるかについては、電解バフ複合加工の材料除去率 w が加工時間 t に対して一定になること、表面粗さは電解加工に比べてかなり良くなることから考えて、陽極溶出は電解加工のように工作物の表面全体で生じるのではないと思われる。これは、電解バフ複合加工の場合、電解液として工作物が不動態化しやすい酸素酸塩型のものを用いたためでもある。また表面には擦過条痕が形成されているものの、酸素酸塩型の電解液を用いた場合に生じやすい陽極溶出による局所的な溶出痕は見られなかった。このことから電解バフ複合加工の陽極溶出は砥粒の擦過作用で不動態化膜が除去されたところでのみ生じるといえる。

陽極溶出が砥粒の擦過作用で不動態化膜が除去された局所のみで生じる場合の表面粗さの生成機構は、以上の結果より、次のようになっているものと思われる。すなわち、図5-7(a)に示すように円錐状の砥粒が工作物を擦過する場合、工作物に形成される擦

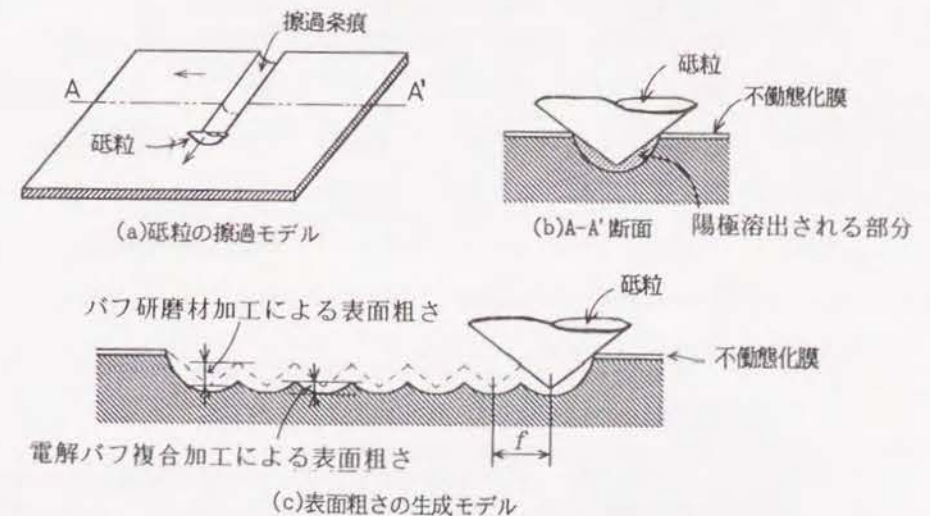


図5-7 電解バフ複合加工の表面粗さの生成モデル

過条痕の断面は同図(b)のようになっているものと思われる。電解が生じない場合には工作物に砥粒の切刃形状が転写されるが、電解が生じると素地が露出した部分に電解電流 I が集中してこの部分が陽極溶出する。工作物が砥粒の擦過方向に対して直交方向に送られている場合には、同図(c)に示すように1回転当たりの送り f の周期的な凹凸が形成され、凹凸の差が表面粗さになる。パフ研磨材加工の表面粗さは同図に破線で示したようにわるくなるが、電解パフ複合加工された表面粗さはこれに比べて良くなる。

5-4-2 表面粗さに影響を及ぼす加工因子

回転円盤型の複合工具電極でステンレス鋼SUS304を加工した場合に測定された、ギャップ電圧 V_g と表面粗さの関係を図5-8に示す。用いたパフ研磨材は粒度 #1500、砥粒の平均粒径 $15[\mu\text{m}]$ のものである。ギャップ電圧 $V_g = 0[\text{V}]$ の場合の値はパフ研磨材のみで加工されたこと意味するが、電解作用がない場合には得られた表面粗さはせいぜい $R_{\text{max}} 0.2[\mu\text{m}]$ 前後であった。

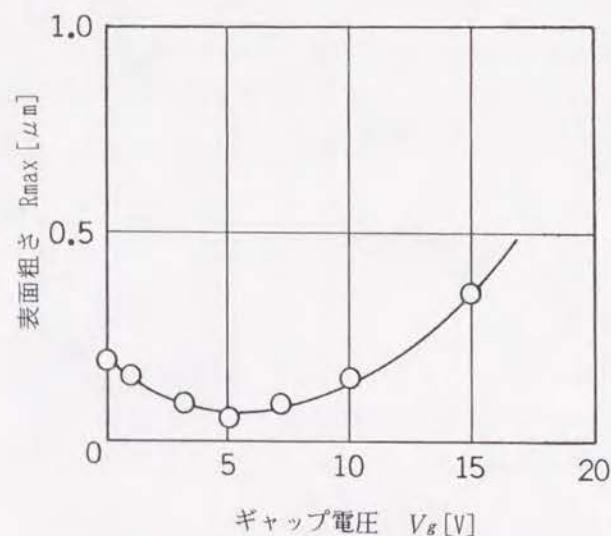


図5-8 ギャップ電圧と表面粗さの関係
(SUS304, 20%aq. NaNO_3 , $N_g = 1050[\text{rpm}]$, #1500パフ研磨材)

ギャップ電圧 V_g が3[V]から7[V]の不働態化域では、表面粗さは電解作用がない場合に比べて良くなり、ギャップ電圧 $V_g = 5[\text{V}]$ 付近で表面粗さは $R_{\text{max}} 0.05[\mu\text{m}]$ と最も良くなった。不働態化域の範囲のギャップ電圧 V_g で加工された工作物は、酸やアルカ

リに浸しても腐食されず、化学的にきわめて安定しているので、表面には不働態化膜が生成されていることが分かった。

ギャップ電圧 V_g が10[V]以上の過不働態化域では、ギャップ電圧 V_g の増加とともに表面粗さはわるくなった。過不働態化域で加工された工作物の表面は全体的に白っぽく、金属顕微鏡で表面を観察すると図5-9に示すように、ステンレス鋼の結晶粒界が陽極溶出してできた小さな溝があり、この溝が表面粗さをわるくしていることが分かった。



50[μm]

図5-9 過不働態化域の電解条件で電解パフ複合加工されたステンレス鋼SUS304の表面

次に不働態化の電解条件の下で粒径の異なるパフ研磨材を用いて加工を行った場合に測定された研磨材に加えた単位面積あたりの荷重 P_F と表面粗さの関係を図5-10に示す。パフ研磨材は単位面積あたりの荷重 P_F が増加すると、砥粒のくい込み量 h_d が増すという性質がある。同図において、単位面積あたりの荷重 P_F が増加するにつれて表面粗さがわるくなるのは、砥粒のくい込み量 h_d が増大して、形成される擦過条痕の凹凸が大きくなるためである。

表面粗さは粒度が大きく、粒径の小さい砥粒が固着されたパフ研磨材を用いた場合ほど良くなった。これは粒径の小さい砥粒で形成される擦過条痕の深さが粒径の大きいものに比べて浅くなることと、パフ研磨材の性質として粒度が増すほど研磨材の砥粒密度 m_s が高くなるために、研磨材に加えた荷重 F が多数の砥粒で分散され、1つの砥粒

に加わる力が小さくなったためと思われる。

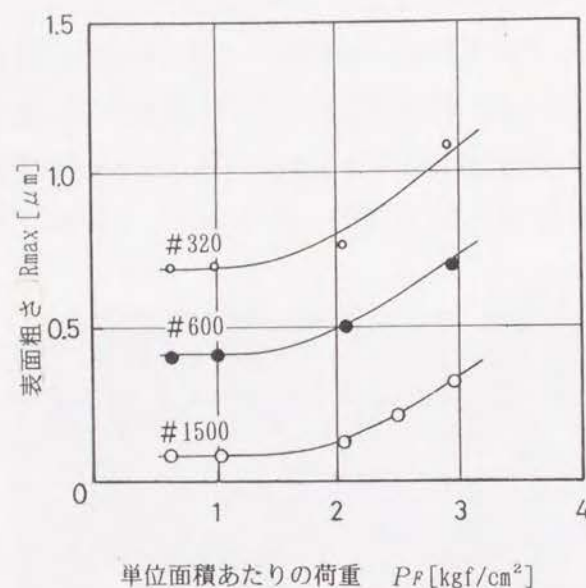
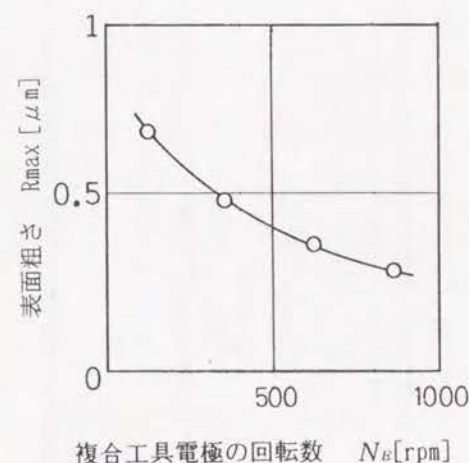


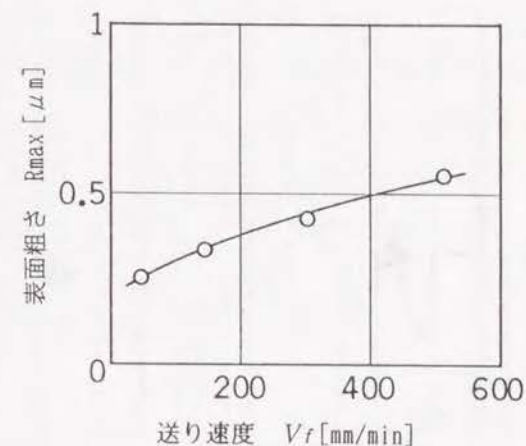
図5-10 パフ研磨材に加えた単位面積あたりの荷重が表面粗さに及ぼす影響
(SUS304, 20%aq. NaNO_3 , $N_E=1050$ [rpm], $V_g=5$ [V])

一方、複合工具電極の回転数 N_E を変えて加工を行うと、表面粗さは図5-11(a)に示すように複合工具電極の回転数 N_E が増加するにつれて良くなった。また工作物の送り速度 V_f を大きくすると同図(b)に示すように表面粗さはわるくなった。このように表面粗さが工作物の送り速度 V_f 、複合工具電極の回転数 N_E に影響されるのは、第4章の4-2-1で解析した砥粒の擦過軌跡において、X軸方向の軌跡の間隔 ΔX が変化するためである。すなわちX軸方向の軌跡の間隔 ΔX は式(4-8)で表され、工作物の送り速度 V_f に比例し、複合工具電極の回転数 N_E に反比例する。また V_f/N_E は1回転あたりの送り f [mm/rev]と等しい。図5-11(a), (b)のグラフから送り f と表面粗さの関係を調べたところ、図5-11(c)に示すように表面粗さは送り f にほぼ比例することが分かった。

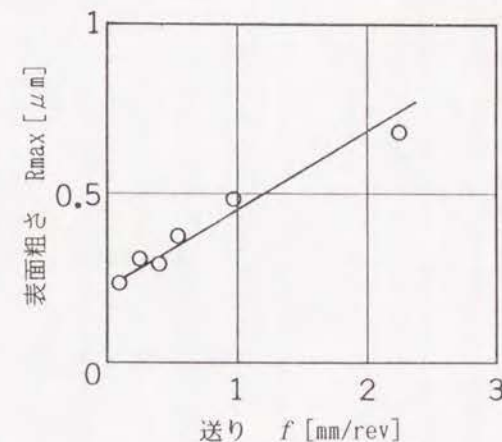
なお第4章の4-2-1で述べたように、砥粒の擦過軌跡のY軸方向の間隔 ΔY は複合工具電極中心からの距離 y によって変わるので、この影響を調べてみた。図5-12は粒度#320のパフ研磨材を用いて、複合工具電極回転数 $N_E=620$ [rpm]、工作物送り速度 $V_f=510$ [mm/min]でステンレス鋼SUS304を加工した場合の表面のプロフィールをX軸方向とY軸方向について測定した結果を示す。図5-12より次のことが分かる。



(a) 複合工具電極の回転数の影響
(SUS304, 20%aq. NaNO_3 , $V_f=340$ [mm/min], $V_g=5$ [V], #320パフ研磨材)



(b) 送り速度の影響
(SUS304, 20%aq. NaNO_3 , $N_E=620$ [rpm], $V_g=5$ [V], #320パフ研磨材)



(c) 複合工具電極1回転あたりの送りの影響
(SUS304, 20%aq. NaNO_3 , $V_g=5$ [V], #320パフ研磨材)

図5-11 平面工作物を加工する場合の複合工具電極の回転数と送り速度が表面粗さに及ぼす影響

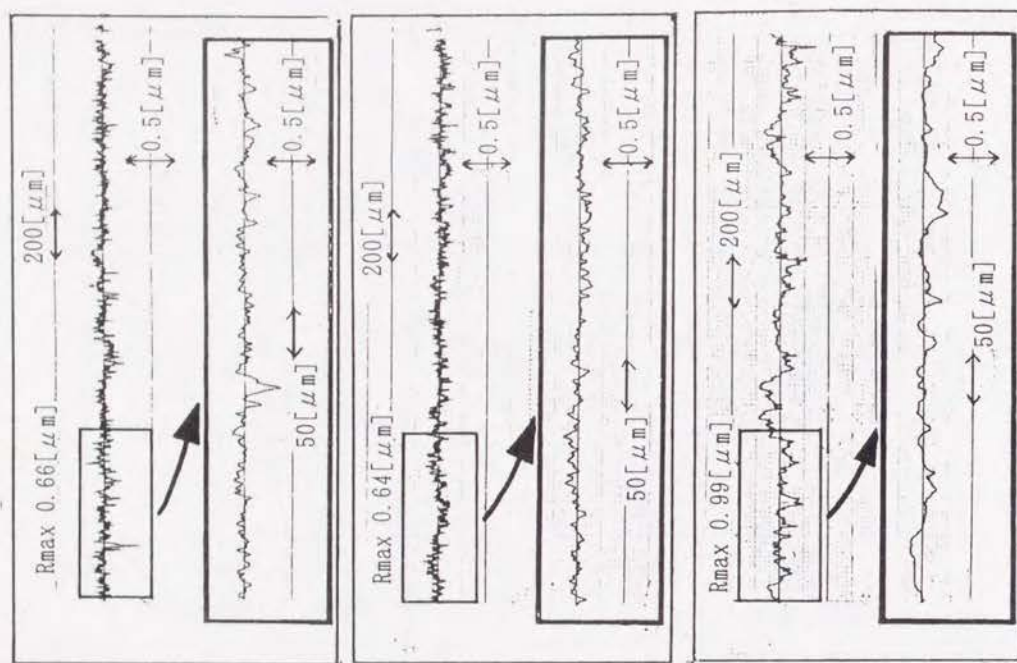
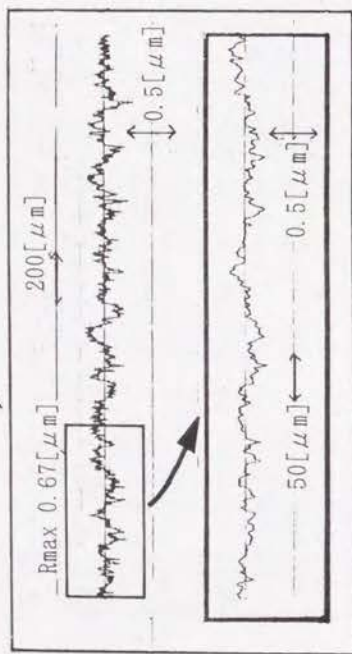


図5-12 回転円盤型複合工具電極で加工された平面工作物の表面プロフィール
(SUS304, 20%aq. NaNO₃, $V_f=510$ [mm/min], $N_g=620$ [rpm], $V_g=5$ [V], $R_g=35$ [mm], #320バフ研磨材)



- ① X軸方向の表面粗さは、工作物上のどの位置においてもほぼ同じである。
 - ② Y軸方向の表面粗さは、複合工具電極中心上 ($y=0$ の位置) において最もわるく、中心から離れるほど軌跡の間隔が狭まるため良くなる。ただし複合工具電極中心からの距離 y が20[mm]以上では表面粗さはあまり変わらない。
 - ③ 複合工具電極中心からの距離 y が20[mm]の位置における表面粗さとX軸方向の表面粗さはほぼ等しい。これは $y=20$ [mm]の位置におけるY軸方向の軌跡の間隔 ΔY とX軸方向の軌跡の間隔 ΔX がほぼ等しくなるためである (図4-6参照)。
- このことより、表面粗さは擦過軌跡の間隔によって決定されることが分かった。

5-4-3 加工能率に影響を及ぼす加工因子

電解バフ複合加工でステンレス鋼SUS304を加工した場合に測定された電流密度 J と材料除去率 w の関係を図5-13に示す。用いたバフ研磨材は粒度 #320である。

電流密度 $J=0$ [A/cm²] の場合の値はバフ研磨材のみで加工されたことを意味するが、電解作用がない場合に得られた材料除去率 w は90[mg/min]であった。ギャップ電圧 V_g が印加されて電流密度 J が増大すると、材料除去率 w は電流密度 J に比例して増大した。電流密度 $J=2.5$ [A/cm²] の場合、材料除去率 w は440[mg/min]まで高められた。

次に不動態の電解条件の下で、

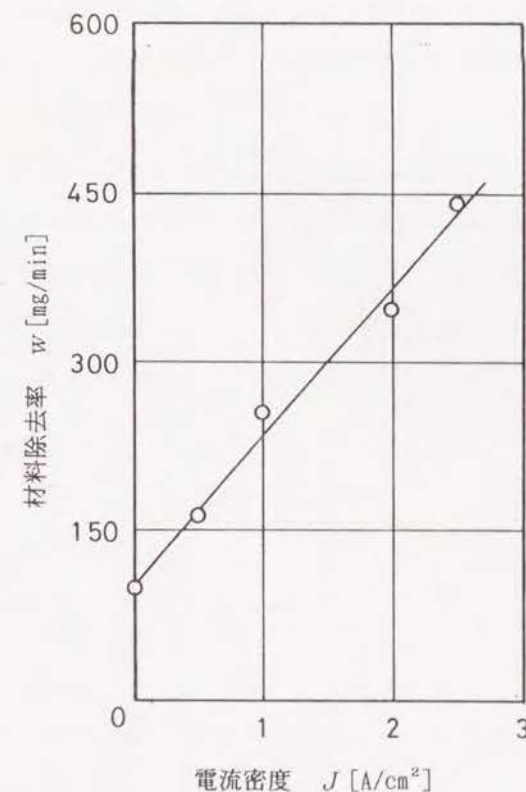


図5-13 ステンレス鋼SUS304を加工した場合の電流密度と材料除去率
(SUS304, 20%aq. NaNO₃, $V_f=340$ [mm/min], $N_g=620$ [rpm], #320バフ研磨材)

パフ研磨材の砥粒の擦過作用が材料除去率 w に及ぼす影響を調べた。複合工具電極の回転数 N_R を変えて加工を行うと、材料除去率 w は図5-14に示すように複合工具電極の回転数 $N_R=500$ [rpm] まで回転数に比例して増大した。回転数 N_R が500 [rpm] 以上になると、材料除去率 w の増加割合が減少するのは、第4章の4-4-2で述べたように砥粒の擦過速度が増して動圧によってパフ研磨材が浮き上がったためと思われる。

またパフ研磨材に加えた単位面積あたりの荷重 P_F を変えた場合には、材料除去率 w は図5-15に示すように、単位面積あたりの荷重 P_F に比例して増大した。単位面積あたりの荷重 P_F が増加して材料除去率 w が増大するのは、パフ研磨材の砥粒密度 m_* が増して工作物を擦過する作用砥粒数 $M_{\#}$ が増すためであるが、電解作用がない場合（電流密度 $J=0$ の場合）に比べて電解作用がある場合（電流密度 $J=1$ [A/cm²] の場合）

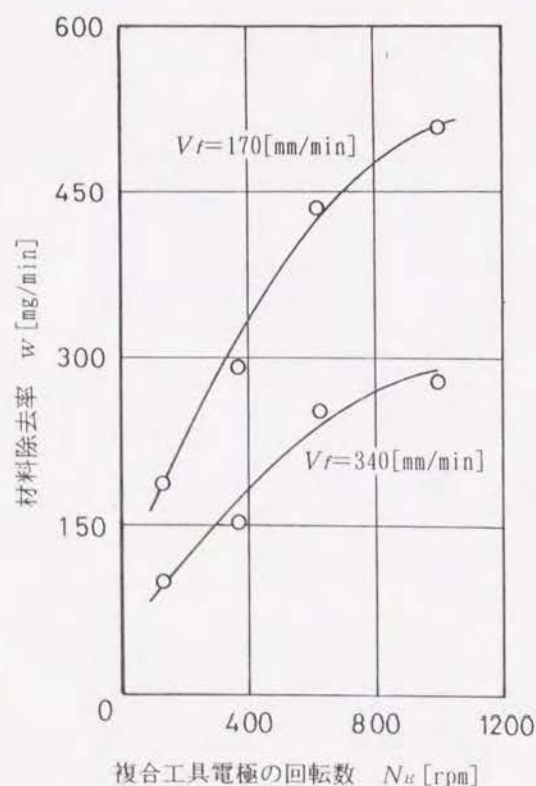


図5-14 ステンレス鋼SUS304を加工した場合の複合工具電極の回転数と材料除去率 (SUS304, 20%aq. NaNO₃, $J=1$ [A/cm²], #320パフ研磨材)

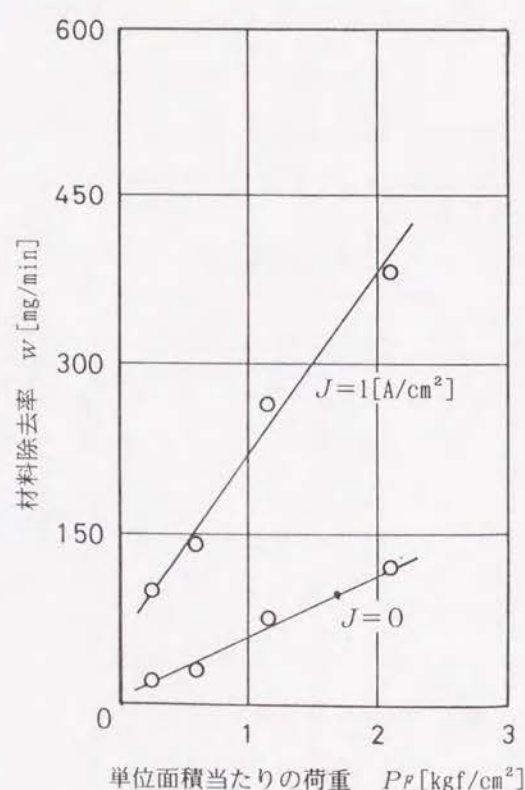


図5-15 ステンレス鋼SUS304を加工した場合の単位面積あたりの荷重と材料除去率 (SUS304, 20%aq. NaNO₃, #320パフ研磨材)

の方が材料除去率 w が高いのは、砥粒の擦過作用で不動態化膜が除去された部分が陽極溶出により除去されるためである。

このように電解パフ複合加工でステンレス鋼SUS304を加工すると、砥粒の擦過作用による除去に電解の陽極溶出が加わるために、材料除去率 w はパフ研磨材加工の場合に比べて高くなる。なお材料除去率 w は、電解作用に関する加工因子と砥粒の擦過作用に関する加工因子の両方に影響される。

5-4-4 遊離砥粒を用いた電解パフ複合加工による鏡面加工

平均粒径 $2[\mu\text{m}]$ の Al_2O_3 の微細な砥粒でステンレス鋼SUS304の加工を行った場合に測定された、電解液中の砥粒濃度 C_I と材料除去率 w の関係を図5-16に示す。

パフ研磨材加工の場合、材料除去率 w は砥粒濃度 C_I が5 [g/l] までは増加したが、それを越えるとほぼ一定の値になった。なお砥粒濃度 $C_I=3$ [g/l] の条件における電解液中の砥粒密度は、砥粒が電解液中で等間隔に拡散していると仮定すると、電解液単位体積あたり約 5.8×10^{11} [個/cm³] になる。この値は単位面積あたりに換算すると 7×10^7 [個/cm²] となり、パフ研磨材の砥粒密度 m_* に比べて5~6桁大きいことになる。

電解パフ複合加工の場合には、陽極溶出が加わるために材料除去率 w はパフ研磨材加工の場合に比べて大きくなったが、パフ研磨材加工の場合と同様に、砥粒濃度 C_I を5 [g/l] 以上にしても材料除去率 w は増大しなかった。

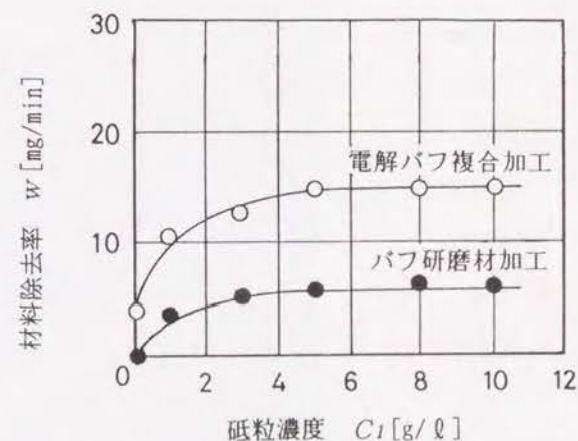


図5-16 電解液中の砥粒の濃度が材料除去率に及ぼす影響 (SUS304, 20%aq. NaNO₃, $V_g=5$ [V], $d_a=2$ [μm])

工作物の材料除去率 w が砥粒濃度 $C_l = 5 \text{ [g/l]}$ 以上ではほぼ一定になる原因を調べるために、加工後の研磨布面を観察したところ、図5-17に示すように、電解液の噴出口付近に砥粒が付着しているのが認められた。

付着している砥粒の量は、砥粒濃度 C_l が 5 [g/l] 以上になるとほぼ同じであった。したがって砥粒濃度 C_l を 5 [g/l] 以上にしても工作物の材料除去率 w が増加しないのは、研磨布に付着する砥粒の量に限度があるため、付着しなかった砥粒は直ちに排出されて工作物の擦過に関与しなかったと考えられる。

次に平均粒径 $2 \text{ [}\mu\text{m]}$ の砥粒で電解パフ複合加工を行った場合に測定された、加工時間 t に対する表面状態の変化を微分干渉顕微鏡で観察した結果を図5-18に示す。

同図(a)は加工前の下地を示すが、前加工の粒度 #1500 のパフ研磨材による擦過条痕で表面が形成されている。同図(b)は加工時間 $t = 80 \text{ [s]}$ 後の表面を示し、前加工で生成された擦過条痕はかなり除去されていた。加工時間 $t = 200 \text{ [s]}$ 後では、表面は同図(c)に示すよう

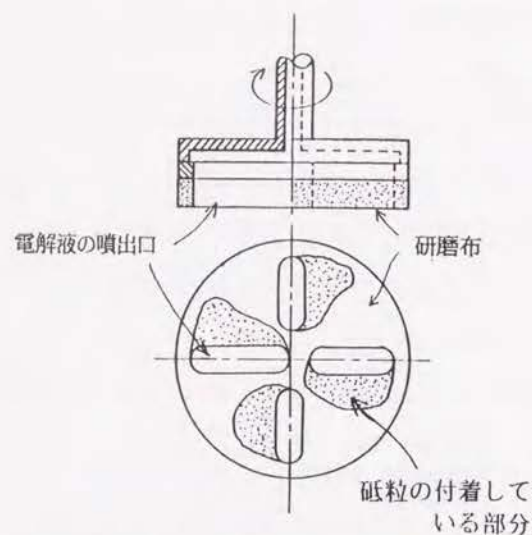


図5-17 加工後の研磨布に砥粒が付着している状況

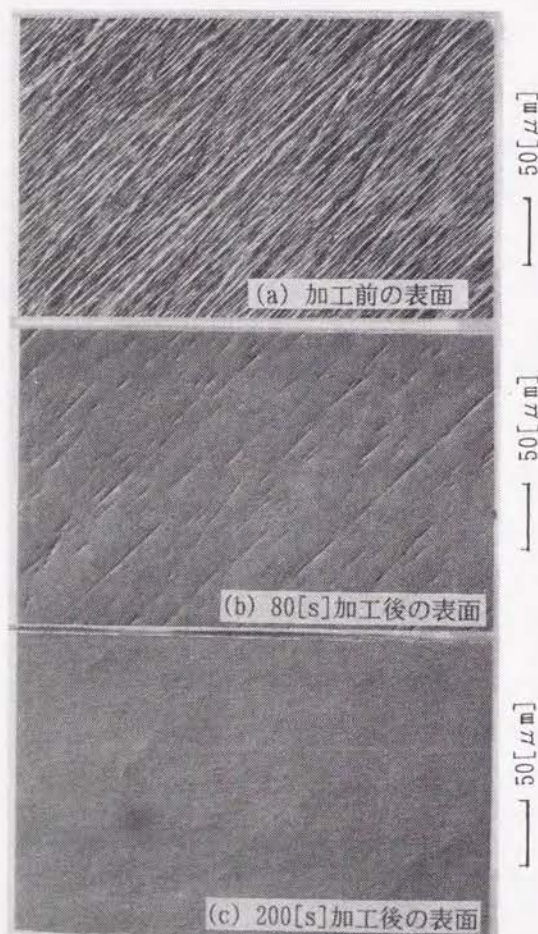


図5-18 加工時間の経過に伴う表面状態の変化 (SUS304, 20%aq. NaNO_3 , $V_g = 7.5 \sim 9 \text{ [V]}$, $d_a = 2 \text{ [}\mu\text{m]}$)

に前加工の際に生成された擦過条痕はほとんどなくなり、表面全体がかなり滑らかになった。なお同図の倍率 ($\times 200$ 倍) では平均粒径 $2 \text{ [}\mu\text{m]}$ の砥粒による擦過条痕は確認できないが、倍率を1000倍にすると、間隔約 $0.1 \text{ [}\mu\text{m]}$ のかなり小さい擦過条痕が確認できた。この結果から、遊離砥粒を用いた電解パフ複合加工を行った場合もパフ研磨材を用いた場合と同様に、基本的には擦過条痕によって表面粗さが生成されることが分かった。

電解加工、パフ研磨材加工、電解パフ複合加工の3種類の加工を行った場合に測定された加工時間 t と表面粗さの関係を図5-19に示す。電解加工の場合には、過不働態化域に相当する 7 [V] のギャップ電圧 V_g を印加しても陽極溶出は生じず、表面粗さは変化しなかった。実験に用いた $20\% \text{NaNO}_3$ の場合、ステンレス鋼 SUS304 が不働態化するギャップ電圧 V_g は5-2節で述べたように 3 [V] 以下であるが、溶出が生じなかったのは電解液中に絶縁性の微細な砥粒があるために電解液の電圧降下が大きくなったことが原因していると思われる。

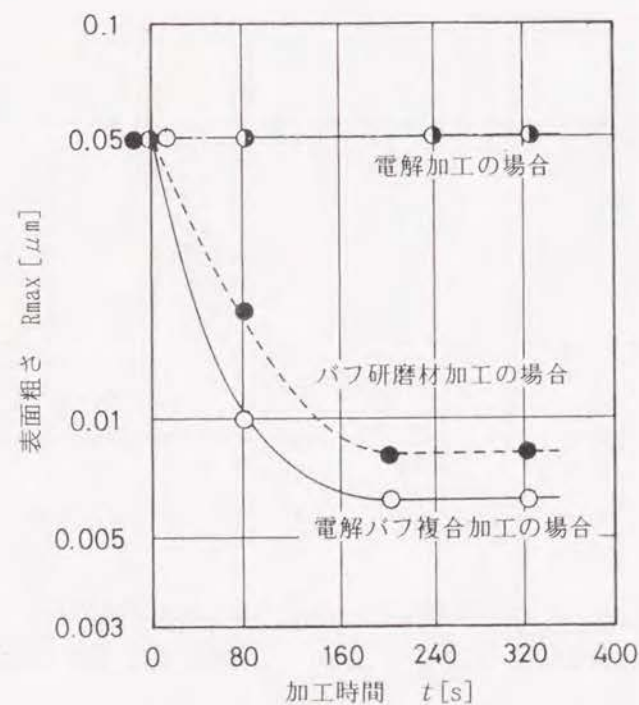


図5-19 各種の加工法を用いた場合の加工時間と表面粗さの関係 (SUS304, 20%aq. NaNO_3 , $V_g = 7.5 \sim 9 \text{ [V]}$, $d_a = 2 \text{ [}\mu\text{m]}$)

バフ研磨材加工の場合には、表面粗さは加工時間 $t=200[s]$ までは急激に良くなるが、それ以後は表面粗さは $R_{\max} 0.008[\mu m]$ で一定になった。電解バフ複合加工の場合には、表面粗さは砥粒の擦過条痕が陽極溶出で滑らかにされるので、 $R_{\max} 0.006[\mu m]$ まで改善された。

5-4-5 形状精度に影響をおよぼす加工因子

図5-20は回転円盤型複合工具電極面下の電流密度 J を変えてステンレス鋼SUS304の加工を行った場合に測定された除去深さ hz の測定結果である。除去深さ hz は複合工具電極中心からの距離 y によって変わり、中心 ($y=0$) から外縁に向けて hz は増大して、 $y=20[mm]$ 付近で最大になり、ここから外縁にかけては急激に減少する (以後、この傾向を中凸パターンという)。任意の距離 y における除去深さ hz は電流密度 J の値によって変わり、電流密度 J が大きくなるとともに増大する。しかし距離 y に対する除去深さ hz の変化の仕方は電流密度 J の値によらず中凸パターンになった。

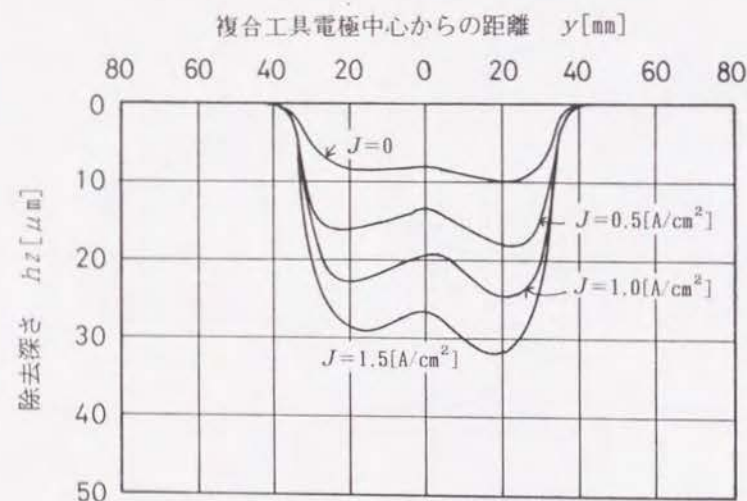


図5-20 電流密度を変えた場合の除去深さの測定結果
(SUS304, 20%aq. NaNO_3 , $V_f=340[\text{mm/min}]$, $R_B=35[\text{mm}]$,
 $N_E=620[\text{rpm}]$, $N_P=12$, #320バフ研磨材)

工作物の送り速度 V_f を変えた場合、複合工具電極の中心からの距離 y に対する除去深さ hz の変化のパターンは図5-21に示すようになった。任意の距離 y における除去

深さ hz は工作物の送り速度 V_f の値によって変わり、送り速度 V_f が小さくなるとともに除去深さ hz が増大する。しかし距離 y に対する除去深さ hz の変化の仕方は工作物の送り速度 V_f の値によらず中凸パターンになった。

複合工具電極の回転数 N_E を変えた場合、複合工具電極の中心からの距離 y に対する除去深さ hz の変化のパターンは図5-22に示すようになった。任意の距離 y における除去深さ hz は回転数 N_E の値によって変わり、回転数 N_E が大きくなるとともに除去深さ hz が増大する。しかし距離 y に対する除去深さ hz の変化の仕方は回転数 N_E の値によらず中凸パターンになった。

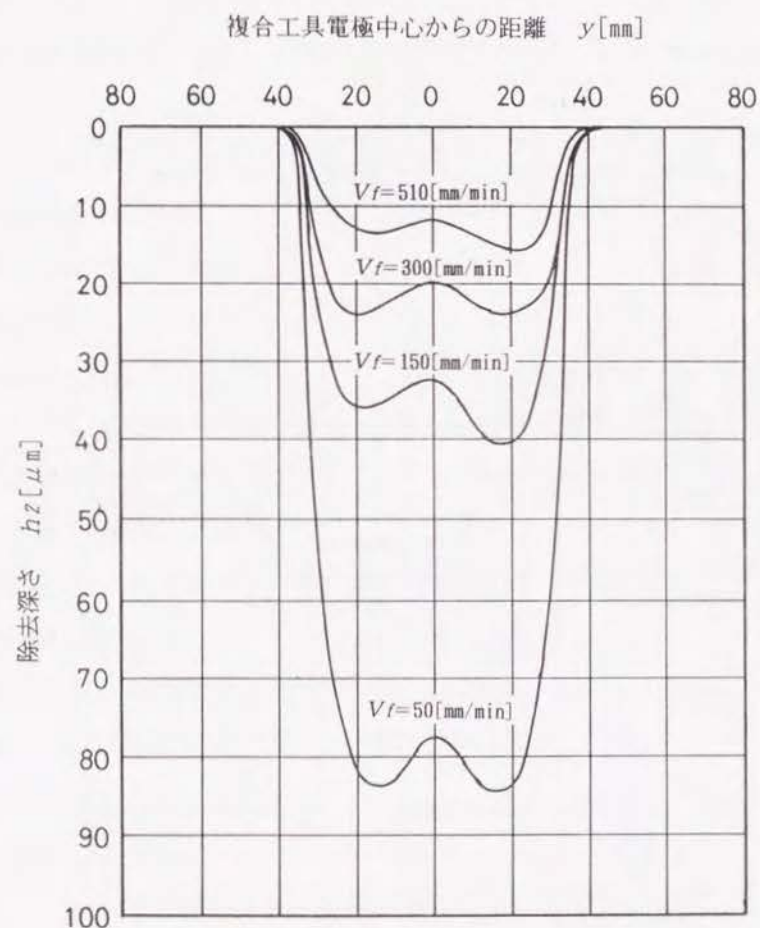


図5-21 工作物の送り速度を変えた場合の除去深さの測定結果
(SUS304, 20%aq. NaNO_3 , $N_E=620[\text{rpm}]$, $R_B=35[\text{mm}]$,
 $J=1[\text{A/cm}^2]$, $N_P=12$, #320バフ研磨材)

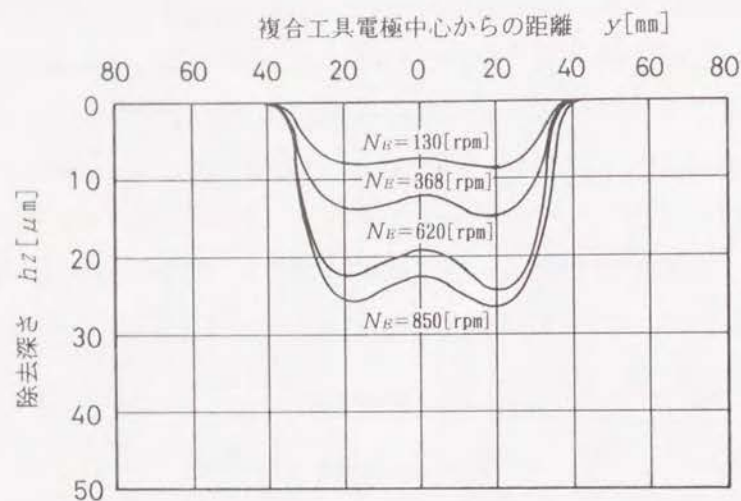


図5-22 複合工具電極の回転数を変えた場合の除去深さの測定結果
(SUS304, 20%aq. NaNO₃, $V_f=340$ [mm/min], $R_E=35$ [mm],
 $J=1$ [A/cm²], $N_P=12$, #320バフ研磨材)

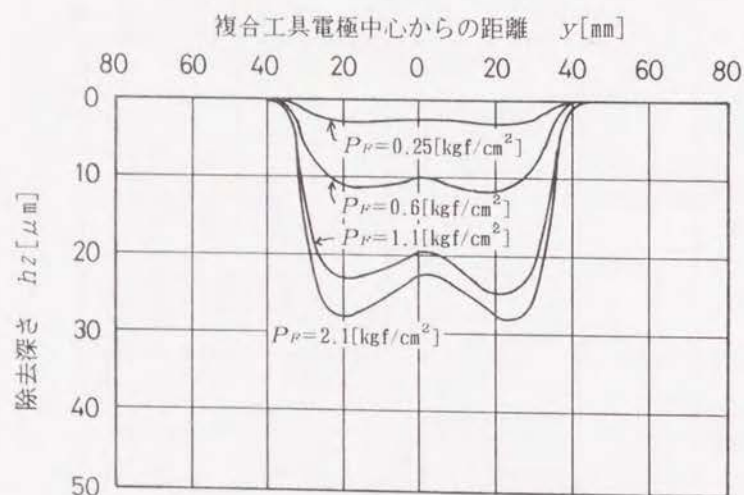


図5-23 単位面積当たりの荷重を変えた場合の除去深さの測定結果
(SUS304, 20%aq. NaNO₃, $V_f=340$ [mm/min], $R_E=35$ [mm],
 $J=1$ [A/cm²], $N_P=12$, #320バフ研磨材)

バフ研磨材の単位面積当りの荷重 P_F を変えた場合、複合工具電極の中心からの距離 y に対する除去深さ h_z の変化のパターンは図5-23に示すようになった。任意の距離 y における除去深さ h_z は単位面積当たりの荷重 P_F の値によって変わり、単位面積当たりの荷重 P_F が大きくなるとともに除去深さ h_z が増大する。

しかし距離 y に対する除去深さ h_z の変化の仕方は P_F の値によらず中凸パターンになった。

このように、回転円盤型複合工具電極を用いて平面工作物を加工した場合、複合工具電極中心からの距離 y に対する除去深さ h_z の

変化のパターンは電流密度 J 、複合工具電極の回転数 N_R といった加工パラメータには影響されず基本的の中凸パターンになることが分かった。

この中凸パターンは第4章の4-2-2で解析した作用砥粒数 M_{sy} が複合工具電極中心からの距離 y に対して変化するパターンと一致する。たとえば図5-21に示した工作物の送り速度 V_f を変えた場合の加工条件について複合工具電極中心からの距離 y と作用砥粒数 M_{sy} の関係を計算すると、図5-24のようになる。任意の距離 y においては作用砥粒数 M_{sy} は工作物の送り速度 V_f が減少するにつれて増加する。これは工作物上の微小な擦過領域を通過するバフ研磨材の長さ L_{ry} が工作物の送り速度 V_f が減少するにつれて増大するためである。作用砥粒数 M_{sy} は、複合工具電極の中心から外縁に向

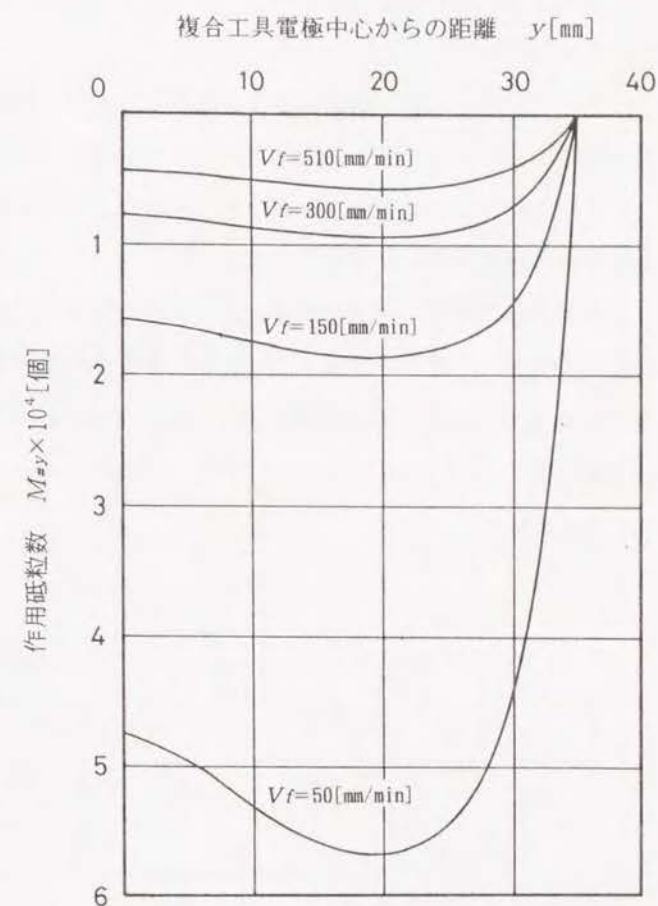


図5-24 工作物の送り速度を変えた場合の作用砥粒数の変化
($N_R=620$ [rpm], $R_E=35$ [mm], $m_s=1$ [個/mm²])

けて増大して $y=20[\text{mm}]$ 付近で最大になり、ここから外縁にかけては急激に減少する中凸パターンになる。

以上のことから回転円盤型の複合工具電極を用いて平面工作物を加工した場合、複合工具電極中心からの距離 y と除去深さ hz の関係は、作用砥粒数 M_{sy} の違いが原因となって中凸パターンになることが分かったので、この結果に基づいて平面度を向上させるための加工条件について検討する。

まず第4章の4-2-2の解析によって得られた、複合工具電極中心からの距離 y と作用砥粒数 M_{sy} の関係を無次元化する。すなわち式(4-11)において距離 y は複合工具電極の半径 R_E に対する比として表し、作用砥粒数 M_{sy} は工具中心 ($y=0$) の作用砥粒数 M_{sy0} に対する比として表す。すなわち

$$\frac{M_{sy}}{M_{sy0}} = \frac{L_{ry}}{L_{ry0}} \quad (5-1)$$

ここに

$$L_{ry} = 2 \cdot \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left(a \cdot \theta^2 + b \cdot \theta + c \right) + \frac{(2 \cdot a \cdot \theta + b)^2}{4 (a \cdot \theta^2 + b \cdot \theta + c)} d\theta$$

$$L_{ry0} = 2 \cdot \int_{\theta_1'}^{\theta_2'} \left(a \cdot \theta^2 + b' \cdot \theta + c \right) + \frac{(2 \cdot a \cdot \theta + b')^2}{4 (a \cdot \theta^2 + b' \cdot \theta + c)} d\theta$$

$$\text{ここに } a = \left(\frac{V_f}{2 \pi \cdot N_E} \right)^2$$

$$b = - \frac{V_f \cdot \sqrt{R_E^2 - (\alpha \cdot R_E)^2}}{\pi \cdot N_E}$$

$$b' = - \frac{V_f \cdot R_E}{\pi \cdot N_E}$$

$$c = R_E^2$$

$$\alpha = y / R_E$$

$$\theta_1 = \sin^{-1}(\alpha)$$

$$\theta_2 = 2 \pi \cdot (N_E \cdot \sqrt{R_E^2 - (\alpha \cdot R_E)^2}) / V_f$$

$$\theta_1' = 0$$

$$\theta_2' = 2 \pi \cdot \frac{N_E \cdot R_E}{V_f}$$

で与えられるパターンについて考える。式(5-1)を数値積分により計算すると図5-25が得られる。同様に実験で得られた除去深さ hz とその距離 y を無次元化すると、そのパターンは式(5-1)で求めた計算値とほぼ一致することが分かった。なお図5-25において d_c は複合工具電極中心 ($y=0$) での除去深さ hz を表す。

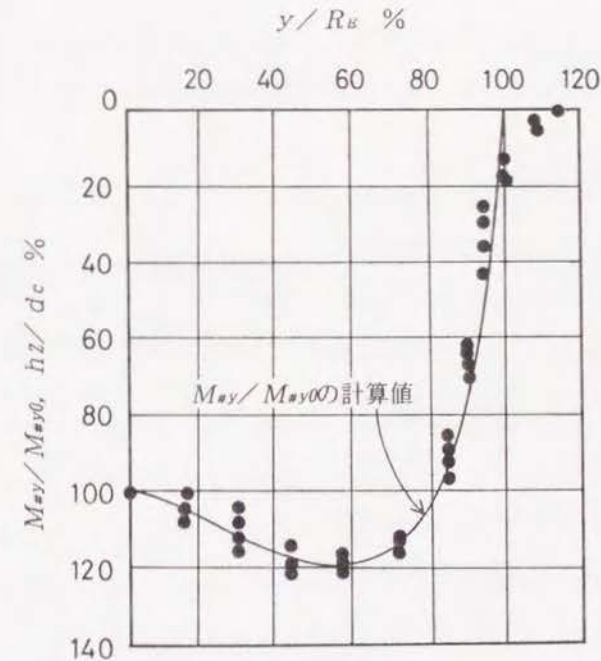


図5-25 無次元化して表した除去深さおよび作用砥粒数 (SUS304, 20%aq. NaNO₃, #320バフ研磨材)

そこで無次元化された中心からの距離 y と除去深さ hz の関係から、平面度が設定された工作物を加工する場合の複合工具電極の半径 R_E と工作物の加工幅 D_z の適正値を検討する。

いま図5-26に示すように、半径 R_E の回転円盤型の複合工具電極で平面工作物を加工する場合を考え、工作物の除去深さ hz と平面度 δ を設定して両者を満足する工作物の加工幅 D_z を求めることとした。加工幅 D_z は次の手順で求める。

①複合工具電極の半径 R_E と中心での除去深さ d_c を設定する。

②設定された平面度 δ と中心での除去深さ d_c から、除去深さの増加率 ε を計算する。すなわち

$$\varepsilon = \frac{\delta + d_c}{d_c} \quad (5-2)$$

③無次元化された中心からの距離 y と除去深さ hz の関係において除去深さの増加率 ε に対応する中心からの位置の比率 (y/R_E) を求める。

④求めた中心からの位置の比率 (y/R_E) に複合工具電極の半径 R_E をかけて加工幅 D_z を計算する。

図5-27は平面度 $\delta = 1 [\mu\text{m}]$ に設定された工作物を加工する場合の複合工具電極の半径 R_E と工作物の加工幅 D_z の関係を以上の手順で計算した結果を示し、中心での除去深さ d_c が增大するほど設定された平面度を満足する加工幅 D_z が小さくなることが分かる。このようにして平面度が設定された工作物を加工する際に適正な複合工具電極の半径 R_E と除去深さ hz を決定することができる。

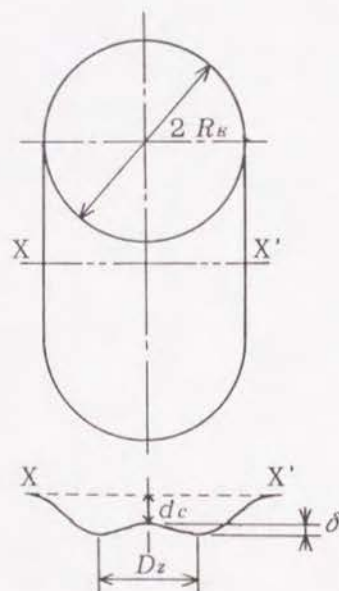


図5-26 平面度が設定された工作物を加工する場合の加工幅

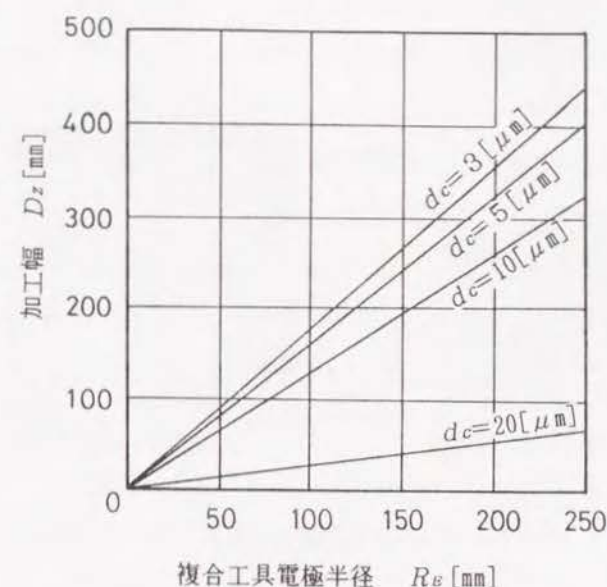


図5-27 平面度 $1 [\mu\text{m}]$ の加工を行う場合の複合工具電極半径と加工幅の関係

5-5 電解バフ複合加工によるステンレス鋼の鏡面加工の実施例

5-5-1 a-Si太陽電池基板の製作

(1) a-Si太陽電池基板に求められる条件

a-Si太陽電池とは、非晶質 (amorphous) のSi半導体薄膜による光起電力効果を利用して、光-電気エネルギー変換を行う機能素子である⁴⁵⁾。a-Si太陽電池は基板の材料の違いにより2種類ある。1つは図5-28(a)に示すようにガラス基板の上にa-Si薄膜を形成させたもので、太陽光線はa-Si薄膜が形成されたガラス基板の裏側から入射する。この方式の問題点は、ガラスで光が吸収されてa-Si薄膜に入射する光のエネルギーが減少することで、これを防ぐためには薄くて光の透過率の高いガラス基板が用いられている。

他の1つは図5-28(b)に示す基板に金属を用いたもので、この方式では太陽光線をa-Si薄膜に入射させる (実際は透明導電膜を通して) ので、光エネルギーのロスが少ない。基板に用いられる金属には以下のような条件が求められるので、現在のところほとんどステンレス鋼SUS304が用いられている。

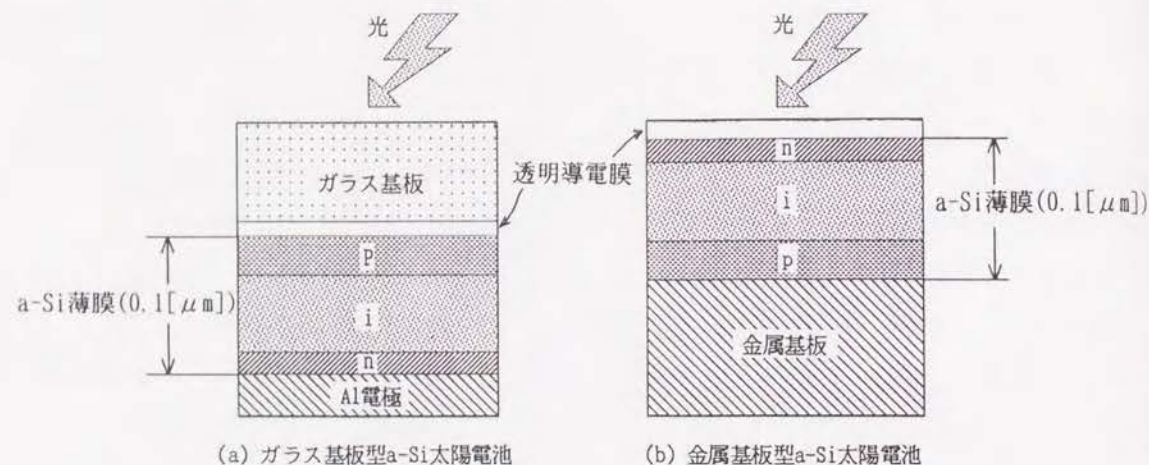


図5-28 a-Si太陽電池の構造

- ①耐食性に優れ、機械的強度が高いこと
- ②a-Si薄膜との密着性がよいこと
- ③腐食しにくいこと
- ④薄板材が入手しやすく、安価なこと
- ⑤鏡面仕上げが容易に行えること

現在、a-Si太陽電池は電卓などの比較的小電力用にはガラス基板が、離島などの電力事情に乏しい場所の補助電源として用いられる大電力用にはステンレス鋼の基板が多用されている。

a-Si太陽電池は、最初の工程でプラズマCVD法などでステンレス鋼の基板上に20~50[nm]の膜厚のP型a-Si半導体薄膜(P層)を真空蒸着して製作する。P層の品質は電池特性に大きく影響する⁴⁶⁾。すなわち基板にピットやスクラッチがあると、その部分にはP層が形成できなくなり、P層の上に形成されるi層と金属基板の間が短絡して発電しなくなる。短絡を抑制するためには、基板の表面粗さはP層の膜厚以下すなわち $R_{max} 0.05[\mu m]$ 以下で、かつピットやスクラッチのない表面が必要である。

市販のステンレス鋼圧延板がa-Si太陽電池の基板として使えるかどうかを調べるために、表面粗さとピットを測定した。測定の対象として、3種類の表面の光沢の違う材料を用いた。2Dと呼ばれるものは冷間圧延後のもので、表面粗さは R_{max} 約 $3[\mu m]$ であった。冷間圧延直後にスキンプラスと呼ばれる表面処理を施されたものは2Bと呼ばれ、

表面粗さは $R_{max} 1[\mu m]$ であった。BA材は $R_{max} 0.3[\mu m]$ の表面粗さで、最も表面の光沢が良かった。しかしいずれの材料もそのままではa-Si太陽電池の基板として必要な表面粗さを満足していないことが分かった。

また2B材の表面に存在するピットの深さと数を金属顕微鏡を用いて測定したところ、図5-29に示すように、2B材の表面には深さ数 $[\mu m]$ ~数 $10[\mu m]$ のピットが多数存在することが分かった。また比較的表面粗さが小さいBA材についても、ほぼ同様な深さと数のピットが存在した。市販のステンレス鋼の中にピットが生じる原因は冷却時に生じるブローホール、圧延時に巻き込む塵あいなどさまざまなものがあるので、圧延板の製造段階でピットが生じないように管理することは困難である。したがって市販のステンレス鋼をa-Si太陽電池の基板として用いるためには、表面に存在するピットを除去し、表面粗さを $R_{max} 0.05[\mu m]$ 以下の鏡面に仕上げる必要がある。

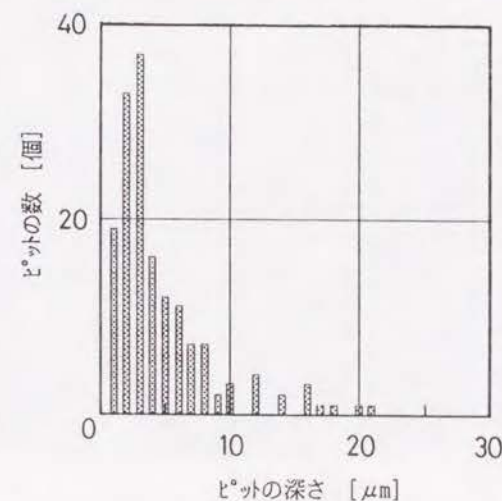


図5-29 ステンレス鋼SUS304の表面のピットの深さの数量分布
(SUS304(2B仕上げ面), 板厚 0.5mm¹, 面積 100[cm²])

(2) 加工装置

鏡面加工装置はラジアルボール盤に搭載した。すなわち加工テーブルに往復運動可能な可変速機構を設け、工作物を固定する加工槽はこの加工テーブル上に取り付けた。ラジアルボール盤の主軸には第3, 4章で用いた回転円盤型の複合工具電極と同じ構造の複合工具電極を取り付けた。

工作物として、板厚0.5[mm]のステンレス鋼SUS304（2 B材）を用いる。これはa-Si太陽電池の寸法に合わせるために、あらかじめプレス加工で100[mm]×100[mm]に切断している。加工槽に6枚の工作物を取り付けた状況を図5-30に示す。

加工は3工程に分けて行う。第1工程では素材のピットを短時間で除去するために、バフ研磨材として粒度#320のものをを用い、電解電流 I は電流密度 J で約 $1\text{ [A/cm}^2\text{]}$ と大きくする。第2工程では、第1工程からすぐに仕上げ加工に移ると、表面にうねりが残りやすいので粒度#600のバフ研磨材を用いる。第3工程は表面を鏡面にするための仕上げ工程で、粒度#1500のバフ研磨材を用い、電解電流 I は陽極溶出によるピットが生じるのを抑制するために電流密度 J を $0.2\text{ [A/cm}^2\text{]}$ と小さくする。

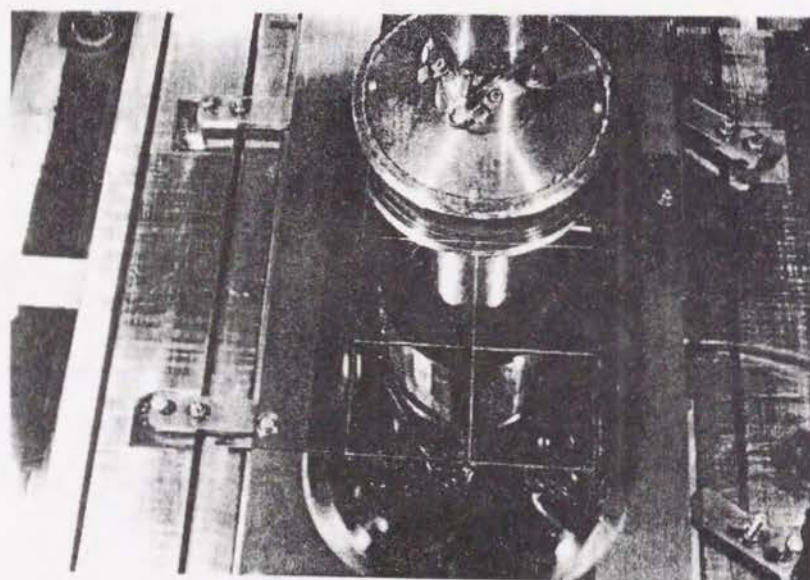


図5-30 加工槽に取り付けた工作物SUS304
(a-Si太陽電池用基板)

(3) 加工結果と実用性の評価

第1工程で加工中の工作物の表面プロファイルの変化を測定した結果を図5-31に示す。加工時間 $t=0.5\text{ [min]}$ 後では比較的浅いピットはほとんど除去されているが、深いものは十分除去できていない。加工時間 $t=1\text{ [min]}$ 後では、ほぼピットの深さ ($2\mu\text{m}$) に相当する除去深さ h_z になるためピットはほとんど除去できた。図5-32は第3工程まで加工した工作物について測定された表面プロファイルを示し、表面粗さ $R_{\text{max}} 0.05$

[μm]の鏡面が得られている。

加工したステンレス鋼の基板上にa-Si薄膜を作製して、電池特性を調べたところ太陽電池として十分機能することが確認され、その後本方法は工業的に使用されている。

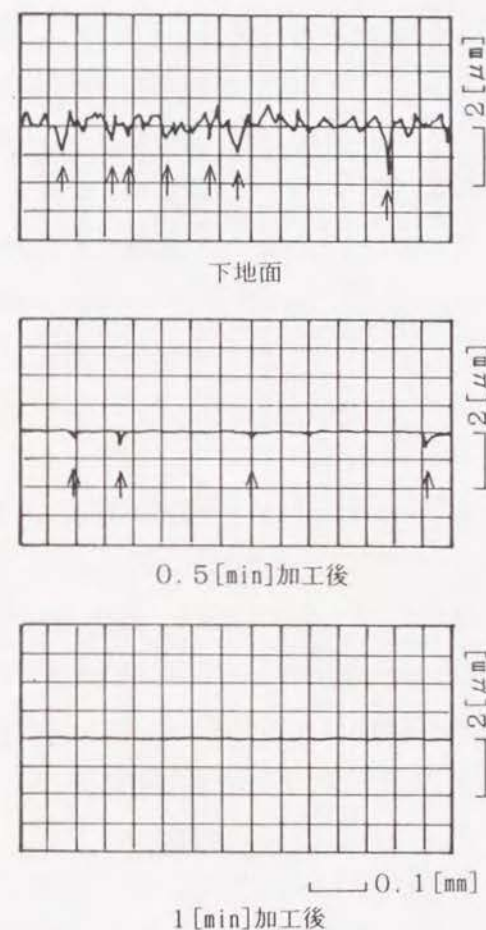


図5-31 第1工程で下地面のピットが除去される様子
(矢印：ピット)

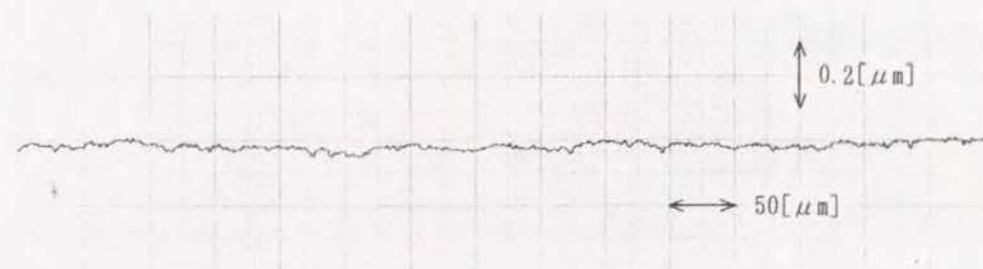


図5-32 第3工程で鏡面に加工されたa-Si太陽電池用基板表面のプロファイル

5-5-2 高性能真空チャンバの製作

(1) 超高真空の必要性と従来の製造技術

近年、a-Si太陽電池をはじめとして高密度磁気ディスク記憶装置、LSIなど機能性薄膜を用いた工業製品が広く使用された。機能性薄膜は、プラズマCVD装置、スパッタリング装置などの真空反応装置で製作される。機能性薄膜の性能は薄膜を構成する元素の純度に大きく影響され、主元素以外の不純物元素が多くなると所定の性能が得られなくなる⁴⁷⁾。

真空反応装置を用いて薄膜を製作する場合、薄膜の主元素は固体状のペレットかガスの形で供給される。現在、これらの原料ガスやペレットは99.999%程度の高純度のものが容易に入手できる。しかし原料が高純度でも真空反応装置のチャンバ内および真空配管系に不純物があると、製作された薄膜に不純物が混入する。そのため最近とくに、装置自体のクリーン度が重要視されている⁴⁸⁾。

真空チャンバの内面、真空配管系の内面に付着した不純物は、真空中では放出されて拡散する(脱ガスという)。真空容器の真空度は、容器内壁からの脱ガス量と真空ポンプの排気量によって決まるため、排気量が大きいか、脱ガス量が少ないほど真空度が高くなる。しかし真空ポンプの能力に限界があるので排気量を高めることは困難であり、真空度を高めるには脱ガス量を少なくしなければならない。そのためには、材料の表面を化学的に清浄化するだけでは不十分で、表面の凹凸を小さくして実表面積を極力小さくしなければならない。

現在、真空チャンバ、真空配管系に主として用いられるのはステンレス鋼である。これらに用いられるステンレス鋼は脱ガスを抑制するために、酸洗い、電解加工などにより表面を清浄化している。しかしこれらの材料は表面粗さが $R_{max} 2 \sim 3 [\mu m]$ 程度であるため、次世代の超LSIを製造するために要求される超高真空を得るためには十分でなく、鏡面が必要である。

(2) 高性能真空チャンバの製作と評価

鏡面加工されたステンレス鋼SUS316Lで真空チャンバを作り、真空度の測定を行った。製作した真空チャンバの外観を図5-33に示す。チャンバ本体の寸法は直径150[mm]、高

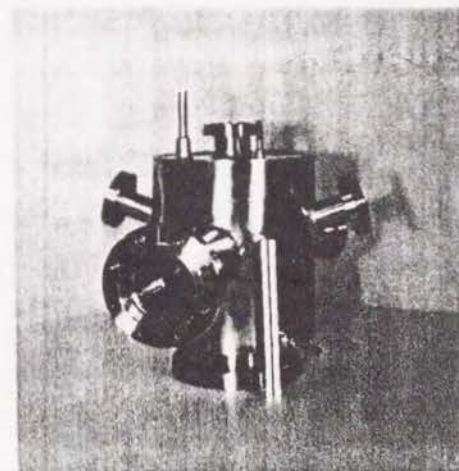


図5-33 製作した真空チャンバの外観

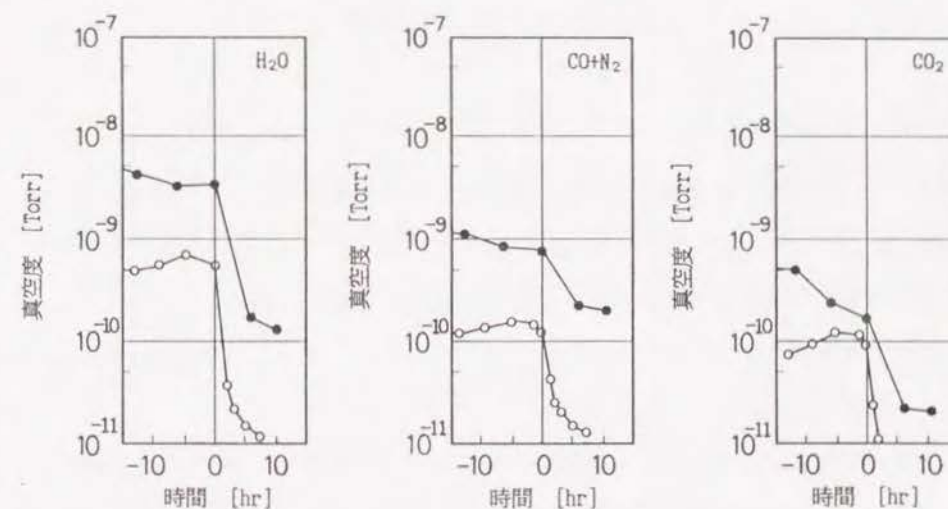


図5-34 真空チャンバ内のガス分圧の時間的評価
(—○— 電解バフ複合加工, —●— バフ研磨材加工)
(-10~0[hr]はターボ分子ポンプ使用、0~10[hr]はサブリーションポンプ使用)

さ350[mm]である。チャンバには真空ポンプをつなぐためのフランジと、真空計を取り付けるためのフランジを5カ所設けている。

チャンバはパイプの内面を切削加工によって表面粗さ $R_{\max} 6[\mu\text{m}]$ に加工し、所定の形状に溶接した後、5-5-1で述べた工程で電解バフ複合加工を行った。この加工によりチャンバ内面の表面粗さは $R_{\max} 0.05\sim 0.1[\mu\text{m}]$ の鏡面に仕上げられた。

図5-34に鏡面加工したチャンバを真空ポンプで吸引してチャンバ内に残存する H_2O 、 $\text{CO}+\text{N}_2$ 、 CO_2 のガス分圧の変化を測定した結果を示す。比較のために内面をバフ研磨材加工で表面粗さ $R_{\max} 0.5[\mu\text{m}]$ に加工したチャンバについて測定されたデータを併記した。電解バフ複合加工で鏡面加工された真空チャンバはバフ研磨材のみで加工されたチャンバに比べて、それぞれのガス分圧が1桁小さくなっていることが確認でき、材料からの脱ガスが極めて少ないことが分かった。この加工法も実用に供されている。

5-6 結 論

ステンレス鋼の不動態化膜の特徴を検討し、電解バフ複合加工による鏡面加工実験を行って加工能率と品質について調べた。さらに電解バフ複合加工によるステンレス鋼の鏡面加工の実施例をあげて、その特徴についても検討した。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) ステンレス鋼は、酸素酸塩型の電解液を用いた直流電解により、不動態化膜が生成される。ステンレス鋼の不動態化膜は膜厚 h_f が数10[nm]のオーダーできわめて薄いので、陽極溶出による局所的な溶出痕が生じる恐れがある。したがって、電解バフ複合加工でステンレス鋼を加工する場合には、ギャップ電圧 V_g を小さくする必要がある。
- (2) 電解バフ複合加工でステンレス鋼の加工を行うと、材料除去率 w はバフ研磨材加工に比べてかなり大きくなり、表面粗さは電解加工に比べてかなり良くなった。これは、電解バフ複合加工の陽極溶出が電解加工のように表面全体で生じるのではなく、砥粒の擦過作用で不動態化膜が除去されたところでのみ生じたためである。
- (3) ステンレス鋼が不動態化するギャップ電圧 V_g を印加して粒度#1500より高い粒

度のバフ研磨材を用いて加工を行なったところ、表面粗さ $R_{\max} 0.05[\mu\text{m}]$ の鏡面を得ることができた。ただしステンレス鋼は、結晶の粒界部分が陽極溶出しやすいため、加工能率を高めようとしてギャップ電圧 V_g を大きくし過ぎるとこの部分の陽極溶出が先行して溝が生じ、表面が荒れるので注意を要する。

- (4) 表面粗さは、送り f の周期で工作物に転写された砥粒の切刃形状が陽極溶出で滑らかにされて生成されることが分かった。そのため、表面粗さはギャップ電圧 V_g と、砥粒の擦過作用に関する因子（粒径、バフ研磨材の単位面積当りの荷重 PF 、複合工具電極1回転あたりの送り f ）に支配される。
- (5) 遊離砥粒を用いた電解バフ複合加工を行った場合にも、バフ研磨材を用いた場合と同様に、擦過条痕と陽極溶出によって表面粗さが生成されることが分かった。平均粒径 $2[\mu\text{m}]$ の微細な砥粒を用いると表面粗さは $R_{\max} 0.006[\mu\text{m}]$ まで改善でき、材料除去率 w もバフ研磨材加工の場合に比べて大幅に高くなった。
- (6) 工作物の形状精度に関して、回転円盤型複合工具電極で加工された工作物の除去深さ hz は、複合工具電極中心からの距離 y によって変わる中凸パターンになる。これはバフ研磨材の作用砥粒数 M_{sy} が距離 y によって変わることが原因で、距離 y と除去深さ hz の関係は加工パラメータの値が変わっても常に中凸パターンになる。
- (7) 測定された除去深さ hz と複合工具電極中心からの距離 y の関係は、距離 y を複合工具電極の半径 R_k に対して、除去深さ hz を中心での除去深さ d_c に対して無次元化すると1つの曲線で表すことができる。この無次元化された曲線から、平面度が設定された工作物を加工する際の複合工具電極の半径 R_k と除去深さ hz の適正値が決定できる。
- (8) 鏡面加工されたステンレス鋼はa-Si太陽電池の基板として実用できた。また超高真空用のチャンバに用いると、表面からの脱ガスがきわめて少ないので、到達真空度を飛躍的に高められた。

第6章 炭素鋼の鏡面加工

6-1 緒 論

炭素鋼の種類は、C以外の合金元素を加えた材料（合金鋼といわれる）も含めると極めて多い。高精度部品として用いられる代表的なものをあげると、プレス金型のように耐摩耗性が求められる用途に用いられるダイス鋼SKD、ゲージ類に用いられる合金工具鋼SKH、転がり軸受に用いられる軸受鋼SUJなどがある。

これらの材料でできている部品において、鏡面加工が必要な場合がある。たとえばアルミはくやステンレス鋼の薄板を冷間圧延加工するために用いられる圧延ローラは、ローラ表面の凹凸が圧延される材料の表面にそのまま転写されるため、最終段階の圧延工程に使用されているローラは表面が鏡面加工されている。また大型の内燃機関においては回転する軸物は軸受との間で境界潤滑で保持されることが多く、軸物の表面の凹凸が大きいと軸受けの摩耗が早くなる。そのためクランク軸やクロスヘッドピンの表面は鏡面加工されている。

次に炭素鋼を鏡面加工するための除去加工法について考察する。AlやCuなどの非鉄金属の鏡面加工は円筒面、平面について一般に単結晶ダイヤモンド工具を用いた超精密切削で比較的容易に行える。しかしダイヤモンドは炭素鋼に含まれているFeと高温で反応して Fe_3C を作り、刃先の鋭利さを失うので、この加工法で炭素鋼を非鉄金属のように鏡面加工することは困難である⁴⁹⁾。したがって現在、炭素鋼の鏡面加工は砥粒加工で行われている。高精度な転がり軸受や小さな平面の鏡面加工はラッピングで、円筒面は超仕上げで、その他の複雑な形状の物は作業者による遊離砥粒を用いた手仕上げで行われている。

炭素鋼を電解バフ複合加工で鏡面加工する場合の問題は、炭素鋼に含まれるCが陽極溶出せずに表面に残る恐れがあることである。Cは極めて安定な元素であるため金属元素のように電解作用でイオン化して溶出するとは考えにくい。Cが表面に残ると鏡面にはならない可能性がある。

次にバフ研磨材加工する場合、工作物の下地に周期が長く比較的振幅の大きな凹凸（うねりという）があると、バフ研磨材は凹凸に沿って変形して凹凸部の砥粒のくい込み量 h_d に差がなくなる。そのため工作物の下地は凹凸部ともほぼ均一に擦過されて加

工後の表面にうねりが残りやすいという問題がある。

しかしバフ研磨材を用いて研磨作業を行っている熟練技能者の中には工作物を擦過する際に、擦過条痕の向きを下地の凹凸に対して交差させ、しかもその方向にランダム性を持たせることによって、うねりの少ない表面に仕上げる技能を持つものもいる。電解バフ複合加工の擦過条痕の方向性については、回転円盤型複合工具電極によって形成される砥粒の擦過軌跡は第4章の4-2-1で述べたように、傾斜角 θ_{co} が加工時間 t の経過とともに常に変化し、しかも砥粒の電極面下の位置によって変化する。この性質を利用すればうねりの少ない加工を行うことができる可能性がある。

そこでまず炭素鋼を酸素酸塩型の電解液を用いて電解した際の不動態化膜の特徴について調べることにする。次に円筒状の工作物を加工することを想定して工作物に形成される軌跡を解析し、傾斜角 θ_{co} の小さい擦過条痕を形成する方法について検討する。さらに電解バフ複合加工で炭素鋼の円筒状の工作物の表面の加工実験を行って、うねりと表面粗さの小さい鏡面加工を行う方法について検討することとする。

本章の構成は次のようになっている。6-2節では炭素鋼の不動態化膜の特徴について述べる。6-3節では砥粒の擦過軌跡について解析する。6-4節は実験装置と方法について述べる。6-5節は実験結果と考察であり、6-6節は以上をまとめた結論である。

6-2 炭素鋼の不動態化膜の特徴

炭素鋼に生成される不動態化膜は鉄の酸化物になる⁵⁰⁾。代表的な鉄の酸化物としては Fe_2O_3 と Fe_3O_4 がある。 Fe_2O_3 は空気中に炭素鋼を放置したときに表面に生じる赤さびである。赤さびが生じた炭素鋼は放置しておく素地の内部にまで腐食が進行して、精度が必要な部品の加工用材料として利用できなくなる。一方 Fe_3O_4 は黒皮の成分である。黒皮は塩酸には溶けるが、水分に対しては比較的耐食性があり、黒皮が生成された炭素鋼は長期間空気中に放置しても素地内部が腐食されることはない。

酸素酸塩型の電解液を用いて炭素鋼S45Cを電解加工した場合、不動態化膜は Fe_2O_3 になるのか Fe_3O_4 になるのかは定かでない。そこで NaNO_3 水溶液を入れたビーカーの中に炭素鋼S45CとCu板を対向させて浸し、電解反応を調べた。図6-1はこの時のギャップ電圧

V_g と電解電流 I の関係を示すが、炭素鋼S45Cの分解電圧 V_o がギャップ電圧 $V_g=2.4$ [V] 付近であることが分かった。ギャップ電圧 V_g が分解電圧 V_o より小さい範囲において、陰極からは水の電気分解によって H_2 が生じるが、陽極の炭素鋼S45Cの表面では O_2 の気泡が生じるものの、炭素鋼S45Cの溶出は生じなかった。加工時間 t が長くなるにつれて炭素鋼S45Cの表面はますます黒くなった。

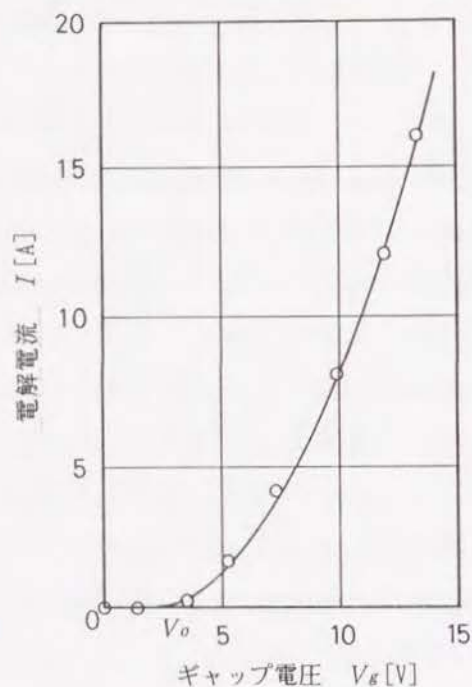


図6-1 炭素鋼を電解加工した場合のギャップ電圧と電解電流の関係
(S45C, $A_e=8[\text{cm}^2]$, 20%aq. NaNO_3 , $I_g=1.5[\text{mm}]$)

加工終了後の炭素鋼S45Cを水洗いして乾燥させた後、空気中に放置して表面の変化の様子を調べたところ、電解液に浸されていない部分（電解電流 I が流れていない部分）では数日後に赤さびが生じた。しかし電解液に浸されて黒みを帯びた部分には赤さびは生じず、加工終了後の状態をかなり長時間保つことができた。以上より、酸素酸塩型の電解液を用いて直流電解した炭素鋼S45Cの表面には化学的に安定な不働態化膜が生成していることが分かった。

なお図6-1においてギャップ電圧 V_g が分解電圧 V_o より大きい場合には（過不働態化域）、炭素鋼S45Cの陽極溶出が生じた。陽極溶出した表面は全体的に黒っぽく見えるが、前述の不働態化の条件で得られたものとは違って、表面には容易に擦りとりと

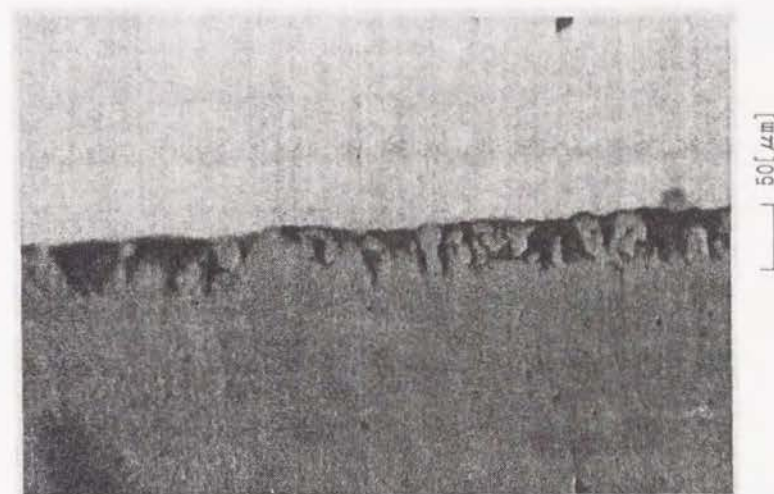


図6-2 電解加工で加工された炭素鋼の断面

ができる黒色の粉末が付着していた。図6-2はこの粉末が表面からどの程度の深さに分布しているかを調べるために、加工終了後の炭素鋼S45Cを切断して得られた材料の表面付近の光学顕微鏡写真である。陽極溶出で表面に形成された凹凸の凹部にこの粉末が付着しているのが分かる。凹部のみに粉末が付着しているのは、不働態化膜が局部的に破壊された部分（凹部）に電解電流 I が集中して、その部分の金属元素のみが陽極溶出し、Cが残ったためではないかと考えられる。

電解バフ複合加工の場合、次のような理由によって陽極溶出で生じたCが表面に残る可能性は少ないのではないかとと思われる。すなわち、

- ①工作物の表面がバフ研磨材の1個の砥粒の擦過作用で不働態化膜が除去される部分はごく小さい。この部分には電解電流 I が流入して、陽極溶出が生じるが、不働態化膜が生成されるまでに投入される電気量 q はごくわずかである。したがってCが残る深さは浅い。
- ②工作物は砥粒で断続的に擦過され、陽極溶出で生じたCは砥粒によって除去される。ただし砥粒の擦過作用で除去されたCがバフ研磨材に付着して、研磨材の目詰まりが生じる恐れがあるので、電解液の流量を多くして排出性を高めるなどの工夫が必要である。

6-3 回転円盤型複合工具電極で円筒状の工作物を加工する際の砥粒の擦過軌跡

うねりの少ない円筒状の工作物の表面を得るために必要な回転円盤型複合工具電極の砥粒の擦過軌跡について解析する。

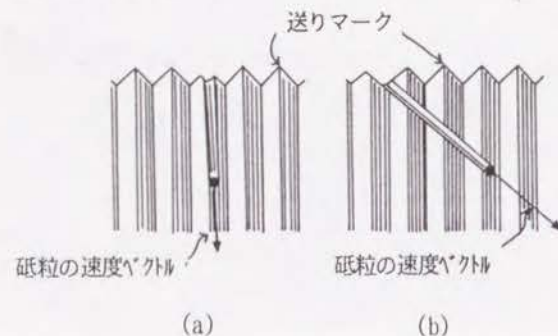


図6-3 工作物の送りマークと砥粒の速度ベクトルの関係

切削加工された円筒状の工作物の表面には図6-3に示すような送りマークが形成されている。この送りマークの凹凸に対する砥粒の速度ベクトルの向きの関係が加工に及ぼす影響について考えると、同図(a)に示すように速度ベクトルの向きが凹凸に沿う場合には凹部も凸部ほどではないが砥粒の擦過によって除去されるので、うねりが残存しやすい。これを避けるために、砥粒の速度ベクトルの向きを同図(b)に示すように前加工で形成された表面の凹凸に対して交差するように（以後、これを斜交擦過という）、図6-4に示す回転円盤型複合工具電極を用いて円筒状の工作物を加工する方法について考える。この方法は、回転円盤型の複合工具電極によって形成される擦過条痕が工具の回転中心より離れた位置においては傾斜角 θ_{wc} が小さくなることを利用している。そのため回転円盤型複合工具電極の回転中心を円筒状の工作物の回転軸に対して距離 H_c だけオフセットさせている。

この場合の砥粒の擦過軌跡を図6-5に示すモデルに基づいて解析する。パフ研磨材は回転円盤型複合工具電極の回転中心 O から H_c だけ離れた位置で工作物に接しているとする。複合工具電極の回転中心 O から半径 R の位置にある砥粒 G が工作物を擦過する際の速度ベクトル V_w は、砥粒 G の回転円盤型複合工具電極による速度ベクトル V_E と工作物の回転による速度ベクトル V_N の和であり

$$V_w = V_E + V_N \quad (6-1)$$

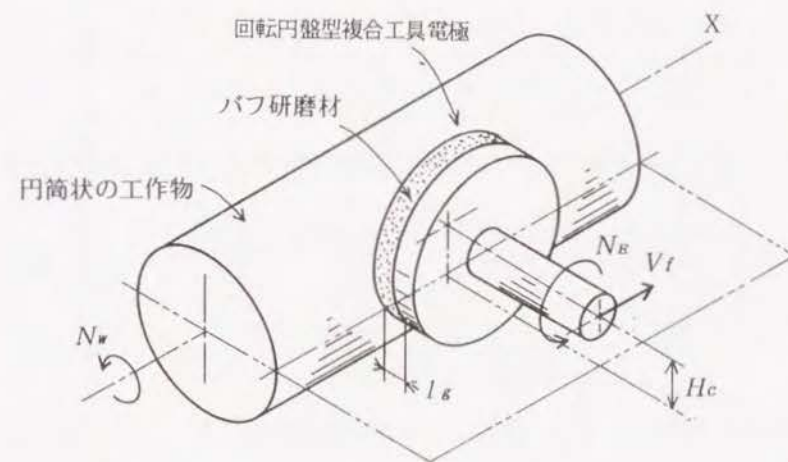


図6-4 回転円盤型複合工具電極による円筒状の工作物の加工方法

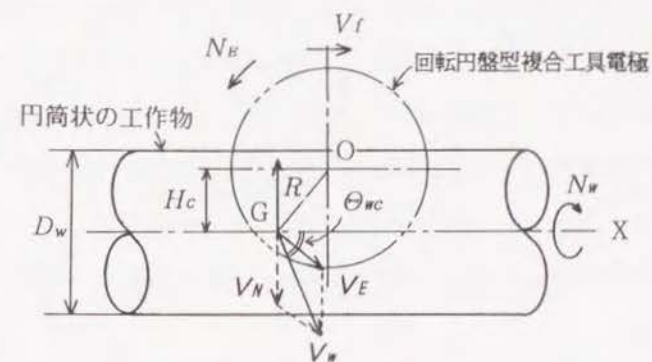


図6-5 オフセットを有する回転円盤型複合工具電極で円筒状の工作物を加工する場合の砥粒の速度ベクトル

となる。また合成された速度ベクトル V_w が X 軸となす角 θ_w は円筒状の工作物の直径を D_w [mm]、その回転数を N_w [rpm] とすると、

$$\theta_w = \tan^{-1} \left(\frac{\omega \cdot R \cdot \cos(\omega \cdot t) - \pi \cdot D_w \cdot N_w / 60}{V_f - \omega \cdot R \cdot \sin(\omega \cdot t)} \right) \quad (6-2)$$

となり、複合工具電極と工作物が接する部分の傾斜角 θ_{wc} は式 (4-4) を式 (6-2) に代入して

$$\theta_{wc} = \tan^{-1} \left(\frac{\omega \cdot R \cdot \cos(n \cdot \pi + (-1)^n \theta_o) - \pi \cdot D_w \cdot N_w / 60}{V_f - \omega \cdot R \cdot \sin(n \cdot \pi + (-1)^n \theta_o)} \right) \quad (6-3)$$

$$n = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$$

$$\omega = 360^\circ \cdot N_E / 60$$

となる。また2つの擦過条痕の交差角 $\Delta \theta_{wc}$ は

$$\Delta \theta_{wc} = |180^\circ - ([\theta_{wc}]_{n=0} - [\theta_{wc}]_{n=1})| \quad (6-4)$$

となる。 $[\theta_{wc}]_{n=0}$ 、 $[\theta_{wc}]_{n=1}$ はそれぞれ式 (6-3) において $n=0$ と $n=1$ の場合に形成される擦過条痕の傾斜角である。

式 (6-3) と (6-4) から、工作物の下地に存在する凹凸をできるだけ大きな交差角 $\Delta \theta_{wc}$ で擦過するためには、送り速度 V_f 、複合工具電極の回転角速度 ω を大きくするのが効果的であるのが分かる。複合工具電極の回転数 N_E と送り速度 V_f を変化した場合の傾斜角 θ_{wc} の計算結果を図6-6に示す。また複合工具電極回転数 N_E の変化による複合工具電極中心からの半径 R の位置にある砥粒の交差角 $\Delta \theta_{wc}$ の計算結果を図6-7に示す。図6-6、図6-7から次のことが分かる。

- ① 擦過条痕の傾斜角 θ_{wc} には送り速度 V_f より、複合工具電極の回転数 N_E の方が大きく影響する。
- ② 複合工具電極の回転数 N_E を大にするほど擦過条痕の交差角 $\Delta \theta_{wc}$ の最大値と最小値の差が大きくなり、工作物の回転軸に対して様々な傾斜角 θ_{wc} を有する擦過条痕が形成される。
- ③ 擦過条痕同士が交差することによって形成される交差角 $\Delta \theta_{wc}$ の幅はオフセット量 H_c によって変化し、 H_c の値が小さいほど幅は小さくなり、 $H_c=0$ の場合は交差角 $\Delta \theta_{wc}$ は0となって全て同じ方向に擦過条痕が形成される。

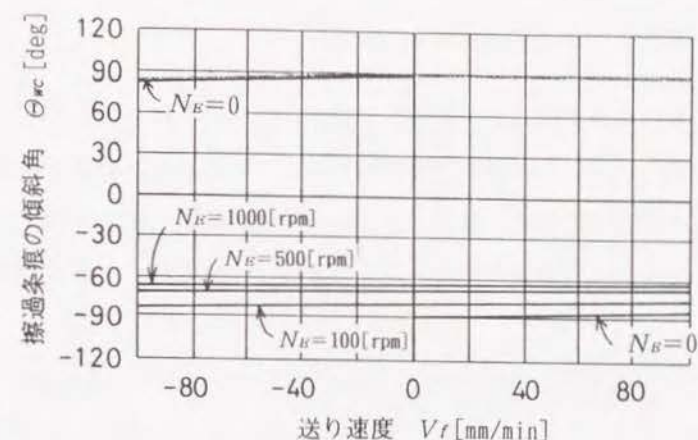


図6-6 擦過条痕の傾斜角と送り速度、複合工具電極の回転数の関係

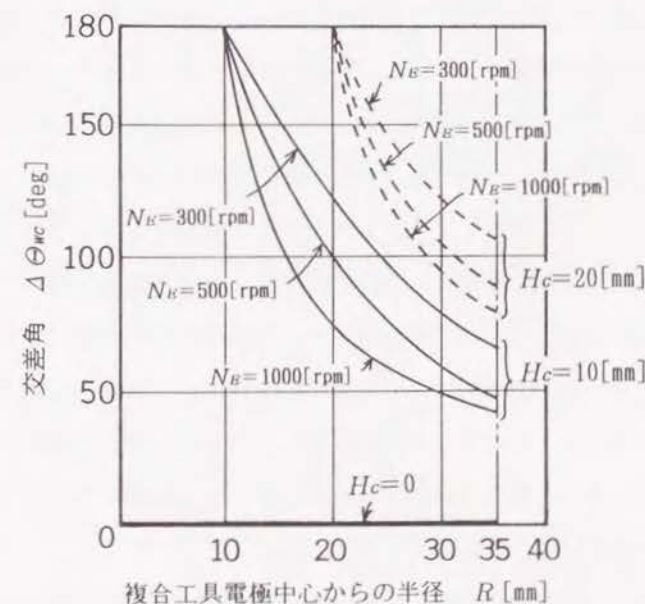


図6-7 複合工具電極の回転数を変えた場合の交差角の変化を表す計算結果

6-4 実験装置と方法

6-4-1 円筒状の工作物が回転しない場合

工作物の下地のうねりが平滑化される様子を調べるために、静止した円筒状の工作物を加工する。そのために用いた実験装置の概略を図6-8に示す。装置本体はNCフライス盤に搭載したものをを用い、主軸に給電・給液機構付きの回転円盤型の複合工具電極を取り付け、その下面にバフ研磨材を装着する。これらはすべて第3、第4、第5章の場合と同じである。

工作物は構造用炭素鋼S45Cの円筒（直径50[mm]、長さ300[mm]）で、加工槽の内部に精密バイスで水平に固定されている。この工作物は前もってノーズ半径0.4[mm]のサーメット工具を用いて送り0.13[mm/rev]、切削速度113[m/min]で切削加工され、表面粗さは R_{\max} 8~10[μ m]に、うねりは約1[mm]の周期で振幅2~3[μ m]に仕上げられている。

電解液として10%の NaNO_3 水溶液を用い、電解液のタンクからフィルタを介して複合工具電極に供給する。電解用の電源としては直流定電圧電源装置を用い、+極は工作物に、-極は複合工具電極に接続する。

円筒状の工作物の上方から複合工具電極を回転させながら押付け、工作物の回転軸の方向に一定速度で往復運動させる。工作物の回転軸に対する複合工具電極の回転中心のオフセットはNCフライス盤のテーブルをY軸方向に H_c だけ移動させて与える。

オフセット量 H_c を与えた場合のうねりの平滑化作用を調べる実験と条痕の交差角 $\Delta\theta_{wc}$ がうねりに及ぼす影響を調べる実験を行う。前者では、オフセット量 H_c の値を変えて加工を行い、複合工具電極の通過回数（以後、パス数 N_p という）が増していく過程での表面のプロフィールの変化を触針式の形状測定機で測定する。後者では、擦過条痕の交差角 $\Delta\theta_{wc}$ の範囲を限定して加工を行うために、図6-9に示すリング状の複合工具電極を用いる。この複合工具電極には、リングの幅 S_R [mm]と直径 d_R [mm]を変えることにより擦過条痕の交差角 $\Delta\theta_{wc}$ を任意の値に設定できるようにリング状のバフ研磨材が取り付けられている。

なおうねりはJIS B 0610に基づいて基準長8[mm]のろ波最大うねり W_{CM} （以後、うねりという）として求める。

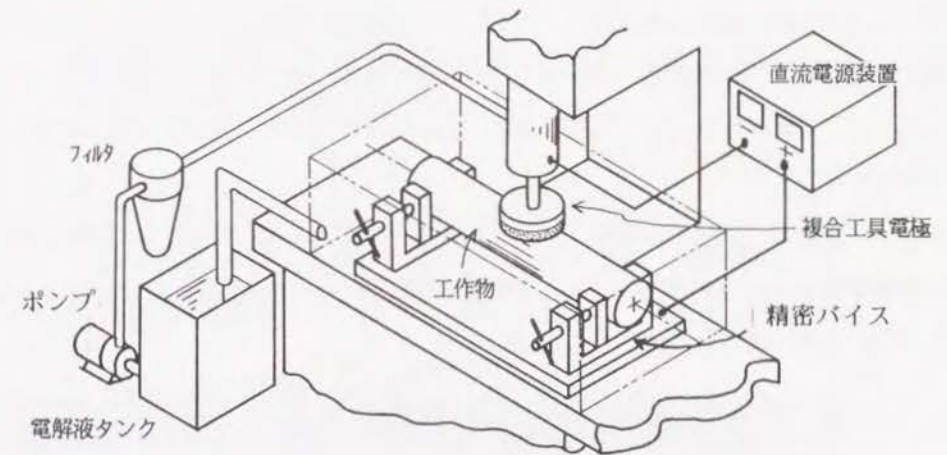


図6-8 静止した円筒状の工作物の加工装置の概略

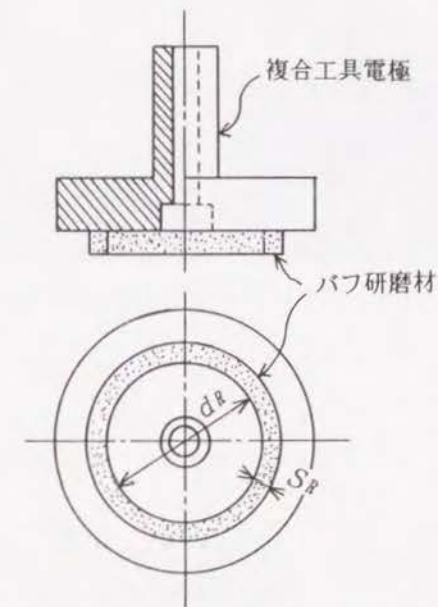


図6-9 リング状の複合工具電極の構造

6-4-2 円筒状の工作物が回転する場合

オフセットを与えて円筒表面の加工を行い、加工後のうねり W_{CM} と真円度を調べるために用いた実験装置の外観を図6-10に示す。旋盤のチャックと心押し台で工作物を両持ち支持する。回転円盤型の複合工具電極は旋盤の刃物台に絶縁物を介して工作物の回転軸に対して直交するように取り付ける。なおオフセット量 H_c は厚さの違う敷き板を刃物台に敷いて与える。

実験は円筒状の工作物を回転させて6-4-1と同様の手順で行い、加工後のうねり W_{CM} は触針式の形状測定機で測定した表面プロファイルからろ波最大うねり W_{CM} を求め、真円度は真円度測定機で測定する。

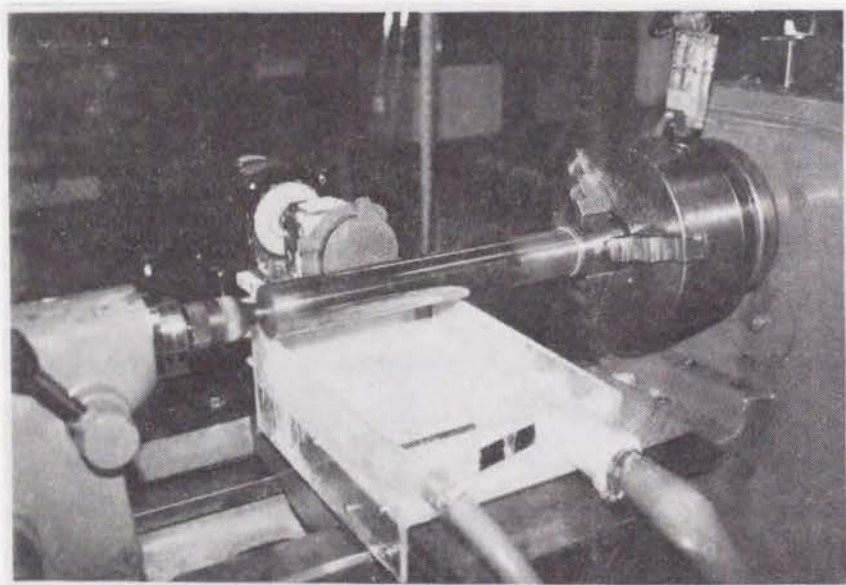
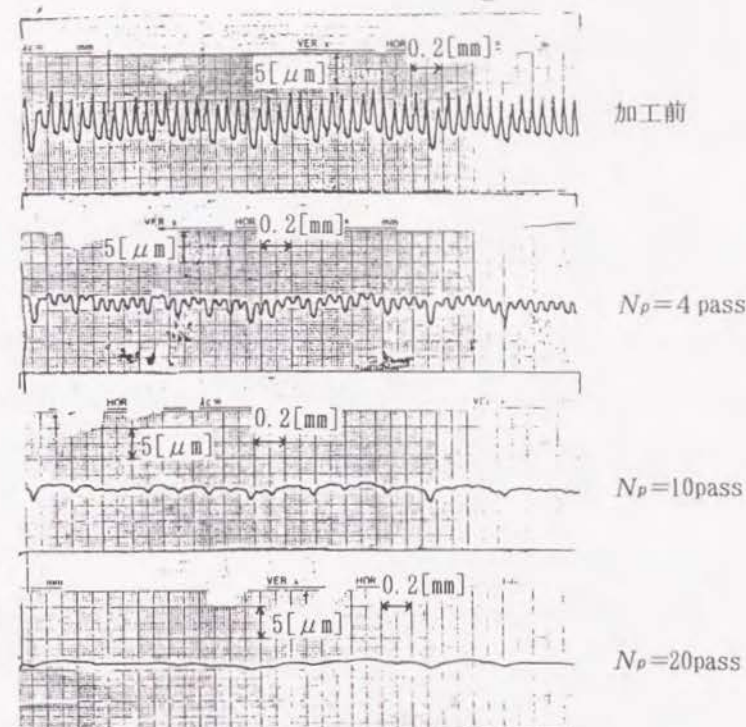


図6-10 円筒状の工作物の加工実験装置の外観

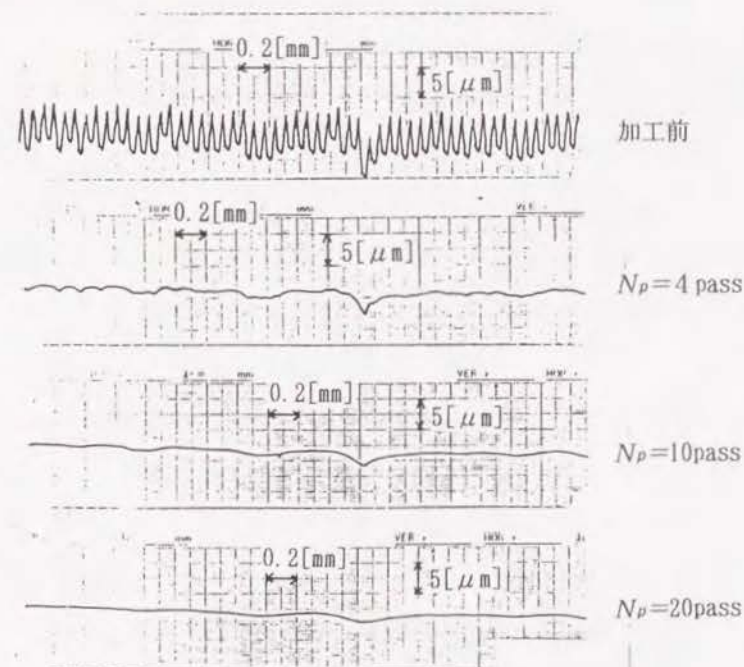
6-5 実験結果と考察

6-5-1 オフセットを与えた場合のうねりの平滑化

静止した円筒状の工作物を加工した場合に測定された、複合工具電極のパス数 N_p の増加に対する表面のプロファイルの変化を図6-11に示す。同図(a)はオフセット量 $H_c = 0$ の場合、同図(b)はオフセット量 $H_c = 20[\text{mm}]$ の場合で、いずれの場合も表面の同一箇所の測定結果である。加工前の表面にみられる周期約 $0.1[\text{mm}]$ の凹凸は前加工である



(a) オフセット量 $H_c = 0$ の場合



(b) オフセット量 $H_c = 20[\text{mm}]$ の場合

図6-11 うねりの平滑化に対するオフセット量の影響
(工具電極のパス数の増加にともなう表面のプロファイルの変化)

切削加工の際に形成された送りマークである。また下地面には送りマークの周期より長い周期のうねりがみられるが、このうねりは切削加工する際の振動、心振れなどによって生じたものである。複合工具電極のパス数 N_p が増えると下地面は平滑化されていく様子が分かる。

オフセット量 $H_c = 0$ の場合には、砥粒の速度ベクトルの向きが送りマークの凹凸に沿うので斜交擦過は行われず、凹凸の振幅が大きい送りマークのみが除去されうねりは残存した。すなわち図6-11(a)の場合には約10passの加工で送りマークはほぼ無くなった。しかし振幅が大きく ($2 \sim 3 \mu\text{m}$)、周期の長いうねりは20passの加工を行っても除去することはできず、 $1 \sim 2 [\mu\text{m}]$ 残存している。

一方、オフセット量 $H_c = 20 [\text{mm}]$ の場合には、砥粒擦過により下地の凹凸は斜交擦過される。図6-11(b)の場合、送りマークはオフセット量 $H_c = 0$ の場合に比べて半分以下の4 passの加工でほぼ平滑化され、20passの加工を行うと局部的に存在する下地の深い凹部を除いて、うねりはかなり平滑化された。

下地から20passの加工までは粒度 #600 のバフ研磨材を用い、20pass以後はその表面を粒度 #1000 のバフ研磨材を用いて加工した場合について、測定された複合工具電極のパス数 N_p とうねり W_{CM} の関係を図6-12に示す。

下地面を粒度 #600 のバフ研磨材で加工した場合、約20passの加工でうねり W_{CM} はほぼ一定値に収束するが、収束する値はオフセット量 H_c の値によって変わり、オフセット量 $H_c = 0$ では $W_{CM} = 1.8 [\mu\text{m}]$ 、オフセット量 $H_c = 20 [\text{mm}]$ では $W_{CM} = 1 [\mu\text{m}]$ とオフセットを与えた場合の方がうねりの小さい表面が得られた。さらにこの得られた表面に対して粒度 #1000 のバフ研磨材を用いて加工を続けた場合、加工開始から60passでうねり W_{CM} はほぼ一定になり、オフセット量 $H_c = 0$ では $W_{CM} = 1.3 [\mu\text{m}]$ 、 $H_c = 20 [\text{mm}]$ では $W_{CM} = 0.5 [\mu\text{m}]$ になりオフセットを与えた場合の方がうねり W_{CM} は小さくなった。

このように一定になったうねり W_{CM} の大きさは砥粒の粒度とオフセット量 H_c の値によって変化した。大きさがほぼ等しいうねりのある下地面に対して、粒度 #600 と #1000 のバフ研磨材を用いて加工を行った場合に測定された、オフセット量 H_c とうねり W_{CM} の関係を図6-13に示す。ここで条痕の傾斜角 θ_{wc} は加工条件をもとにして式(6-3)によって求めた計算値を表したものである。

オフセット量 $H_c = 0$ の場合、傾斜角 θ_{wc} は土約 90° になり擦過条痕は下地の凹凸に沿うので、うねりは粒度 #1000 のバフ研磨材を用いた場合 $W_{CM} = 1.3 [\mu\text{m}]$ になる。オフ

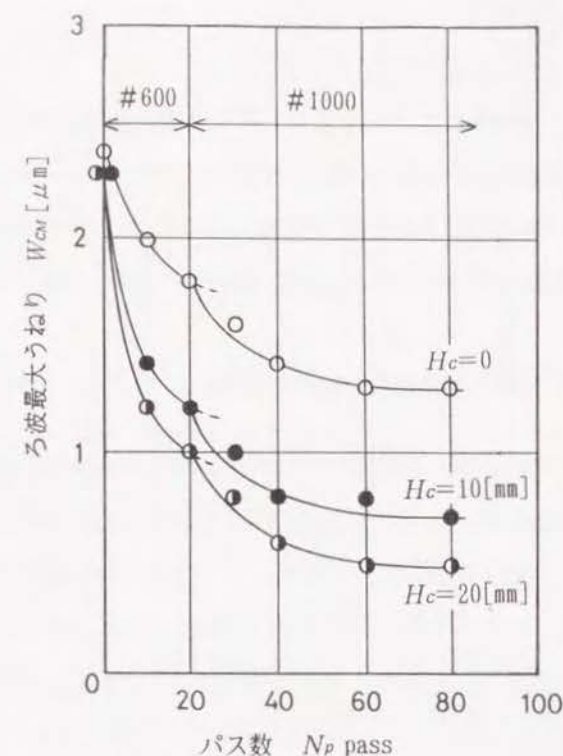


図6-12 複合工具電極のパス数とうねりの関係
(S45C, 10%aq. NaNO_3 , $V_f = 300 [\text{mm/min}]$, $N_R = 505 [\text{rpm}]$, $V_R = 5 [\text{V}]$)

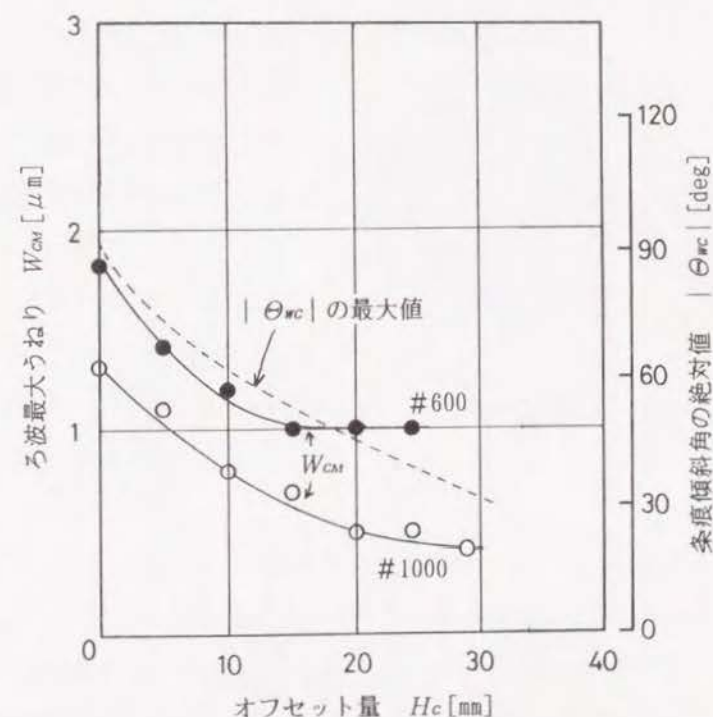


図6-13 オフセット量とうねりの関係
(S45C, 10%aq. NaNO_3 , $V_f = 300 [\text{mm/min}]$, $N_R = 505 [\text{rpm}]$, $V_R = 5 [\text{V}]$)

セット量 H_c を与えると傾斜角 θ_{wc} が小さくなって、下地の凹凸が斜交擦過される機会が増すためうねり W_{CM} は小さくなる。うねり W_{CM} はオフセット量 H_c の値が大きくなり、傾斜角 θ_{wc} の最大値が減少するにつれて小さくなったが、複合工具電極の直径が70[mm]の場合、オフセット量 $H_c=20$ [mm]以上になると、もうそれ以上小さくならなかった。

6-5-2 擦過条痕の交差角がうねりに及ぼす影響

リング状の複合工具電極を用いて静止した円筒状の工作物の加工を行った場合に測定された擦過条痕の交差角 $\Delta\theta_{wc}$ とうねり W_{CM} の関係を図6-14に示す。うねり W_{CM} は交差角 $\Delta\theta_{wc}$ が大きい場合の方が小さくなった。この結果から切削加工で形成された送りマークの凹凸に対して大きな交差角 $\Delta\theta_{wc}$ の擦過条痕を形成する程うねりを平滑化できることが分かる。ただし交差角 $\Delta\theta_{wc}$ を140[deg]以上にすると、うねり W_{CM} は大きくなり、 $\Delta\theta_{wc}=120$ [deg]前後の交差角を与えた場合に最もうねり W_{CM} が小さくなることが分かった。

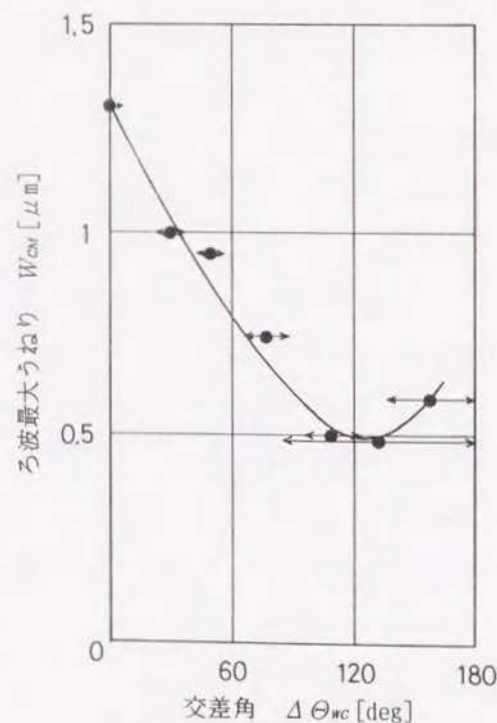


図6-14 交差角とうねりの関係
(S45C, 10%aq. NaNO_3 , $V_f=300$ [mm/min],
 $N_g=505$ [rpm], $V_g=5$ [V], $H_c=20$ [mm])

したがって、図6-13のオフセット量 H_c とうねり W_{CM} の関係を表す実験結果において、オフセット量 H_c を増加させた場合にうねり W_{CM} が小さくなるのは、オフセット量 H_c が大きくなるにつれて、大きな交差角 $\Delta\theta_{wc}$ を有する擦過条痕で擦過される機会が増すことによってうねりの平滑化作用が高められたためと考えられる。

6-5-3 工作物を回転させた場合の真円度と表面粗さ

円筒状の工作物を回転させながらその表面を加工した場合に測定された真円度を図6-15に示す。同図(a)は加工前の切削加工された状態の真円度を示し、同図(b)は加工後のものを示す。加工前の真円度は5.1[μm]であるが、加工後は1.0[μm]になり、真円度が大幅に改善されている。

ここで電解パフ複合加工を行うことにより工作物の真円度が向上する理由について考える。図6-16に示すように工作物の表面が同じ量だけ、除去される場合には加工前の形状が残り真円度は加工前と同じ値になる。電解パフ複合加工の場合、工作物の回転中心Oと複合工具電極面の距離が一定に保たれていると、図6-17に示すように真円でない工作物が高速で回転すると、電解ギャップ l_g は工作物の真円度に相当する変動が生じる。

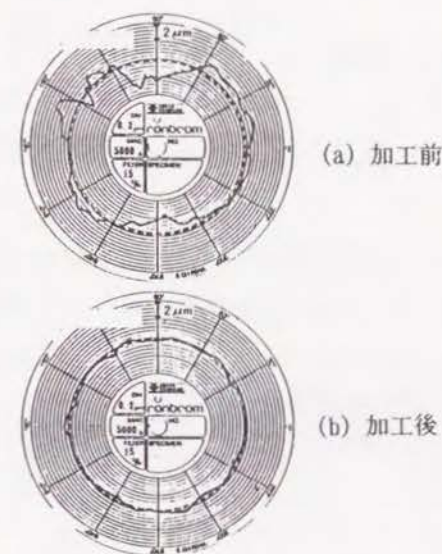


図6-15 加工前後の真円度の比較

ギャップ電圧 V_g が一定の場合、電解電流 I は電解ギャップ l_g が小さくなる程大きくなるので、図中にA、B、Cで示した突出部分は陽極溶出によって除去されやすくなる。また工作物を擦過する作用砥粒数 M_{sy} は、電解ギャップ l_g が小になるほどパフ研磨材の単位面積あたりの荷重 P_F が増大するので、突出部分が砥粒の擦過作用で除去されやすくなる。このような電解電流 I と作用砥粒数 M_{sy} の増加により、突出部が除去

され真円度が向上するのではないかと考えられる。

一方、表面はやや黒みを帯びた光沢面になり、表面粗さは $R_{\max} 0.1[\mu\text{m}]$ 程度であった。工作物は水洗いして乾燥させた後、長時間大気中に放置したが、表面に赤錆は生じなかった。したがって、不働態化膜が生成されていることが分かった。なお懸念されたバフ研磨材の目詰まりはほとんど生じなかった。

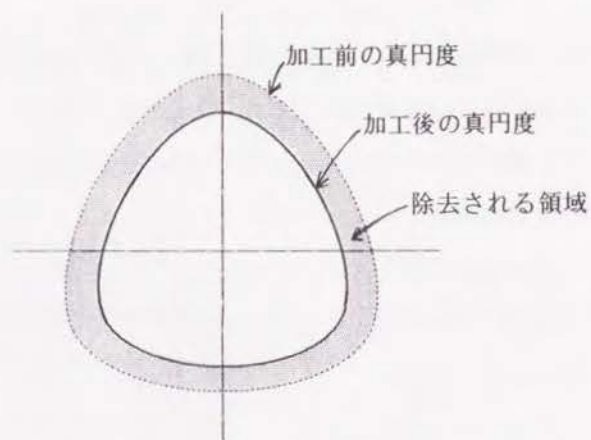


図6-16 工作物の表面が同じ量除去される場合の形状の変化

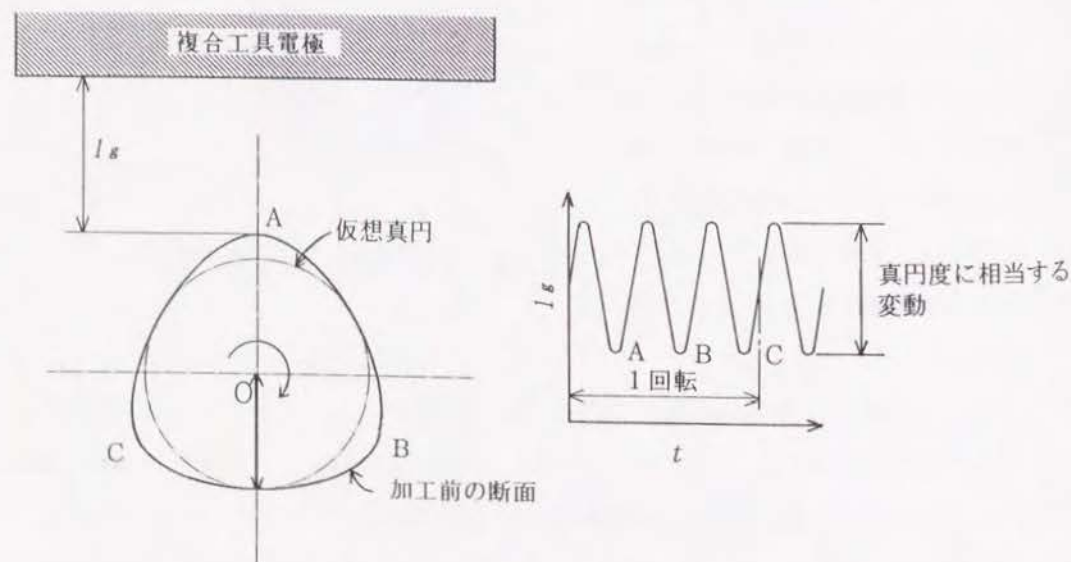


図6-17 真円でない工作物が回転する場合の電解ギャップの変化

6-6 結 論

円筒状の炭素鋼を電解バフ複合加工によって高品位に加工するために、まず炭素鋼の不働態化膜の特徴について検討し、円筒状の工作物の回転中心に対してオフセット量を持つ回転円盤型の複合工具電極を用いた場合の砥粒の擦過軌跡を解析した。さらに斜交擦過によるうねりの平滑化を試みた。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 炭素鋼S45Cを酸素酸塩型の電解液を用いて電解した場合、ギャップ電圧 $V_g=2.4$ [V]以下の範囲で不働態化が生じる。不働態化膜が生成された炭素鋼S45Cの表面は黒みを帯びて錆びにくい。なお炭素鋼S45Cに含まれるCは陽極溶出しないので、電解作用のみで除去すると表面にCの粉末が付着して残る。
- (2) 工作物の下地の凹凸をできるだけ大きな交差角 $\Delta\theta_{wc}$ で擦過するためには、送り速度 V_f と複合工具電極の回転数 N_R を大きくするのが効果的である。また交差角 $\Delta\theta_{wc}$ の最大値と最小値の幅はオフセット量 H_c によって変化し、 H_c の値が小さいほど幅は小さくなり、 $H_c=0$ にすると交差角 $\Delta\theta_{wc}$ は0となる。
- (3) オフセットを与えて円筒状の工作物を加工すると、擦過条痕の交差角 $\Delta\theta_{wc}$ が大きくなって切削加工で形成された送りマークの凹凸が斜交擦過されやすくなる。オフセットを与えない場合 ($H_c=0$) には、凹凸の振幅が大きく周期の長いうねりは複合工具電極のパス数 N_p を増加させても除去することはできなかった。しかしオフセット量 H_c を20[mm]にすると4 passの加工ではほぼ平滑化され、20 passの加工を行うと下地の深い凹部を除いてうねりはかなり平滑化された。
- (4) 下地の凹凸に対して大きな交差角 $\Delta\theta_{wc}$ の擦過条痕を形成する程うねりの平滑化作用は高まる。ただし交差角 $\Delta\theta_{wc}$ を140[deg]以上にした場合、うねりは交差角 $\Delta\theta_{wc}$ を大きくしてもあまり変化せず、 $\Delta\theta_{wc}=120$ [deg]前後の交差角を与えた場合が最もうねりが小さくなった。
- (5) 円筒状の工作物を回転させて加工を行うと工作物の真円度が向上した。これは真円でない工作物を加工した場合に生じる電解ギャップ lg の変化により、電解電流 I 、バフ研磨材の単位面積あたりの荷重 PF が電解ギャップ lg の短い部分で増大し、突出部分が除去されやすくなるためである。

第7章 Tiの鏡面加工

7-1 緒 論

Tiは比重が小さく、かつ引張り強さなどの機械的な強度が大きいので、従来から航空機部品の材料として多用されている。またTiの表面には大気中で化学的に安定な酸化膜が生成されるので、酸、アルカリなどの薬品に対して優れた耐食性を有し、きびしい反応条件にさらされる化学プラントの構成材料としても多用されている。

Tiは上述のように軽くて、強くて、錆びにくいという金属材料として理想的な特徴を有しているにもかかわらず、製錬コストが高いために従来は高価な金属材料であるという見方が一般的であった。そのためTiが工業材料として用いられるのは上述のような特殊な用途に限られていた。しかし最近の製錬技術の発達により、Tiの価格が幾分低下してきたのに伴って、眼鏡フレーム、時計ケース、ゴルフシャフトなどの消費財の用途が拡大しつつある。

このようにTiの用途が拡大されてくると、その用いられ方が多様化してくる。従来Tiは航空機の部品を作る際にはインゴットから切削加工によって所定の形状に加工され、また化学プラント用のものはTiの圧延板や引抜き管を溶接するなど形状を重視したものが主であった。しかし消費財用には表面性状が重要であり、Tiに対しても鉄鋼材料などと同様に表面粗さを小さく仕上げられる加工法が必要である。

研磨加工でTiの表面粗さを小さく仕上げようとする場合、従来の鉄鋼材料用の加工条件ではTiを所望の表面粗さに仕上げることは極めて困難である^{5.1)}。研磨加工でTiを加工する際の問題としては

- ①工具砥石、研磨材の目詰まり、損耗が著しい。
- ②表面にむしれが生じる。
- ③加工中の発熱により歪が生じやすい。

などがある。これらの問題は基本的にはTiが化学的に極めて活性な材料であることが原因している。

そこで本章ではまずTiの化学的活性がバフ研磨材加工に及ぼす影響を検討し、電解バフ複合加工によるTiの鏡面加工の可能性について研究することとした。

本章の構成は次のようになっている。7-2節ではTiの化学的活性がバフ研磨材加工に及ぼす影響について検討し、7-3節ではTiを鏡面加工するための実験装置と方法について述べ、7-4節では実験結果について述べ、それらを考察する。7-5節は以上をまとめた結論である。

7-2 Tiの化学的活性がバフ研磨材加工に及ぼす影響

水を浸したバフ研磨材で金属の表面を擦過すると、バフ研磨材に加えた荷重 F 、砥粒の粒径 d_p に応じた擦過条痕が形成される。バフ研磨材で鉄鋼材料を長時間擦過し続けると、基材のナイロン繊維が損耗し、ついには不織布としての繊維組織が破壊されて使用できなくなる。Tiを擦過すると、同様にバフ研磨材には図7-1に示すように砥粒の損耗、脱落が生じ、かつ不織布の繊維組織に目詰まりが生じ、鉄鋼材料に比べるとずっと短時間の内に擦過条痕を形成できなくなる。このような現象はTiを研削砥石で加工する場合にも同様に生じる^{5.2-5.3)}。

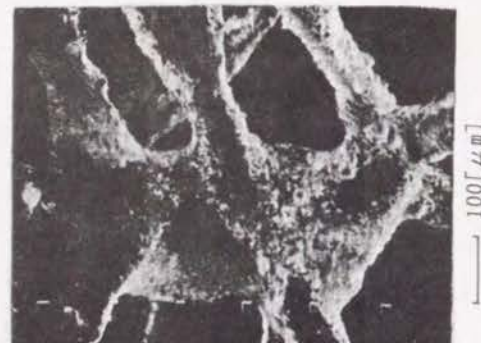
Tiの物理的性質は、第4章の表4-1に示したように熱伝導率 α_t は無酸素銅C1020、工業用純Al A1050、構造用炭素鋼S45Cに比べて小さいが、硬さ、ヤング率などはステンレス鋼SUS304とほぼ同程度の大きさである。しかし化学的性質はそれらの金属とは大きく異なり、第4章の表4-2で示したようにTiはO、S、Nと反応する際の生成自由エネルギー ΔG° が大きく、これらの元素と反応して安定な化合物が生成されやすい。まず、このような性質をもつTiのバフ研磨材加工を行った場合、砥粒の損耗、目詰まりが生じる原因について考察する。

加工液として水を用いた場合にバフ研磨材の砥粒がTiの素地を擦過する様子を図7-2に模式的に示す。上方から荷重 F が加えられた砥粒 G が一定の速度 V_t でTiの素地面を擦過すると、擦過作用によってTiの一部が除去されるが、このとき砥粒 G と素地の接触域 A では温度上昇が生じる。この温度上昇は第4章の4-2-2で検討したように、空气中でTiを粒径 $10[\mu\text{m}]$ の砥粒で擦過速度 $V_t=2[\text{m/s}]$ で擦過した場合、表面で $260.4[^\circ\text{C}(\text{K})]$ 、表面から $5[\mu\text{m}]$ の深さで $120[^\circ\text{C}(\text{K})]$ 温度上昇する。水中で擦過した場合にも、砥粒と工作物の接触域には冷却媒体としての水分が十分浸透しないために、この部分の温度上昇はかなり高くなるはずである^{5.4)}。

加工中の温度上昇によりTiと他の元素との化学的な反応が促進される。たとえば水中



(a) 加工前



(b) 目詰まりの状態
※繊維に付着物がある



(c) Ti加工後
※付着物がついている



(d) Ti加工後
※砥粒の先端が丸くなり、所々で脱落している

図7-1 Tiを擦過した場合のパフ研磨材の変化

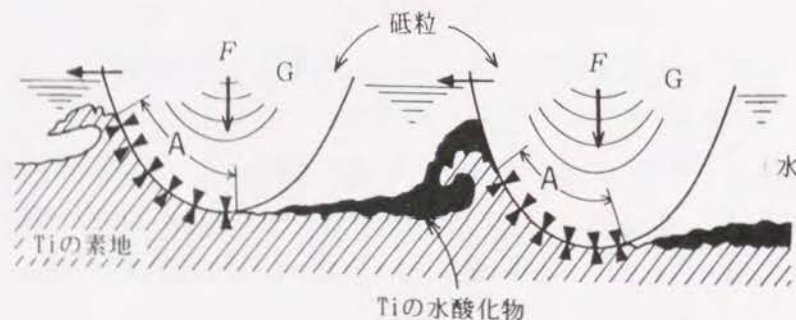


図7-2 水を用いた場合に砥粒がTiの素地を擦過する様子

でTiを擦過した場合、



で表される化学反応が生じ、Tiの表面には非水溶性のTiの水酸化物 $\text{Ti}(\text{OH})_4$ が生成される。この非水溶性の水酸化物はパフ研磨材の目詰まりの原因になるばかりでなく、熱伝導率が小さく、砥粒の切刃に付着すると図7-2に示した接触域Aにおける熱の放散をさらに低下させる。

図7-3は水を浸したパフ研磨材でTiの表面を擦過した場合に得られたTiの表面の金属顕微鏡写真である。図中の横方向に延びる縞模様は擦過条痕である。加工されたTiの表面は擦過条痕が途切れ途切れに形成されて連続性がなく、かつ随所にむしれが生じていることが特徴的である。また図7-3の所々にみられる黒い斑点模様は非水溶性でかつ粘着性の付着物であり、同様な付着物は図7-1(c)に示したようにパフ研磨材の繊維組織にもこびり付いている。

Tiをパフ研磨材で加工する際には次のような点に留意しなければならない。

- ① 砥粒とTi素地との接触域の温度上昇を抑える。
- ② 擦過によって生じるTiの切屑、化学反応によって生じる非水溶性の水酸化物を速やかに排出する。
- ③ 表面に化学的に安定な保護膜を作り、Tiの水酸化物の生成を抑制する。



図7-3 パフ研磨材でTiを擦過した場合の表面

上記の中、①、②を解決するために加工液中に界面活性剤を添加することが考えられる。水に界面活性剤を添加すると、水の表面張力が小さくなり金属の表面のぬれ性が増す。砥粒とTi素地との接触域にぬれ性の高い液体が浸透すると放熱性が高められて、Tiと砥粒の接触域の温度上昇を抑えることができる。また界面活性剤は微粒子の凝集を抑制する効果があり、仮に擦過による温度上昇でTiの水酸化物が生成されても、界面活性剤の作用で分散され、バフ研磨材の繊維組織への付着を低減できるものと思われる。

一方、③を解決する方法としてはTiの表面に電解によって不動態化膜を生成させることが考えられる。Tiを陽極にして電解を行った場合に生成される不動態化膜は、第3章の3-3-2で述べた不動態化膜の測定結果によりTi酸化物の薄膜が表面に生成されることによって生じる。この薄膜は第3章で述べたように加えたギャップ電圧 V_g の値によって膜厚が変化する非晶質の構造を有し、不動態化膜が生成された表面は素地面に比べて硬くなる。

以上を模式的に表すと図7-4のようになる。すなわち電解液には微量の界面活性剤を添加したものを用い、電解によってTiの表面に不動態化膜を生成させ、砥粒の擦過作用で不動態化膜と素地を除去することにより、露出した素地に電解を集中させ、Tiを陽極溶出させることができる。

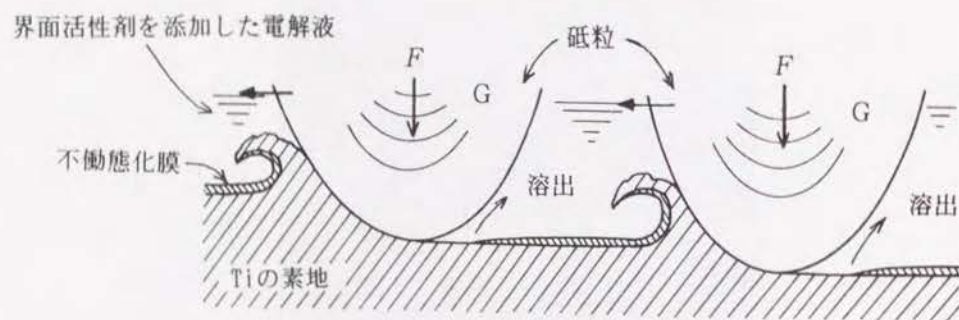


図7-4 電解バフ複合加工によるTiの擦過モデル

7-3 実験装置と方法

Tiの電解バフ複合加工実験には、工業用のTi材料として広く用いられている純度が99.5%のJIS2種の純Ti圧延板を用いる。実験装置として第3、4、5章で使用した回転円盤型の複合工具電極を用いて平面の加工を行う場合と同様に、第3章の図3-1に示したNCフライス盤に搭載したものを用いる。電解液は1%の NaNO_3 水溶液にアルボース薬粧製ソフトS脂肪酸界面活性剤を添加したものを用いる。電解液に添加した界面活性剤の成分を加水分解メチルGC法によって調べた結果を表7-1に示す。この界面活性剤には8種類の脂肪酸が含まれているが、最も含有比が高いのはオレイン酸で、オレイン酸やステアリン酸は金属の表面に吸着してある種の潤滑膜を生成することが知られている⁵⁵⁾。

加工実験は界面活性剤の添加量、電解条件、バフ研磨材の砥粒の粒度が表面粗さに及ぼす影響について調べる。

表7-1 実験に用いた脂肪酸界面活性剤の含有成分
加水分解メチルGC法による

脂肪酸名	組成比 %
オレイン酸	26.2
リノール酸	24.8
ラウリン酸	23.3
パルチミン酸	9.5
ミリスチン酸	8.9
カプリン酸	2.8
カプリル酸	2.6
リノレン酸	1.9

7-4 実験結果と考察

7-4-1 電解作用と界面活性剤が表面粗さに及ぼす影響

電解液として用いた1%の NaNO_3 水溶液に添加する界面活性剤の濃度 C_s を変えてTiの加工を行った場合に得られた、界面活性剤の濃度 C_s と表面粗さの関係を図7-5に示す。粒度#320, #1500それぞれについてギャップ電圧 V_g を印加しない場合と印加した場合について調べた。

ギャップ電圧 V_g を印加しない場合、界面活性剤の濃度 C_s の増加に対し、界面活性剤の濃度 C_s が1%までは表面粗さはある程度良くなった。微量の界面活性剤の添加で、液体の表面張力は下る。界面活性剤を添加しない場合の電解液の表面張力は約 70×10^{-3}

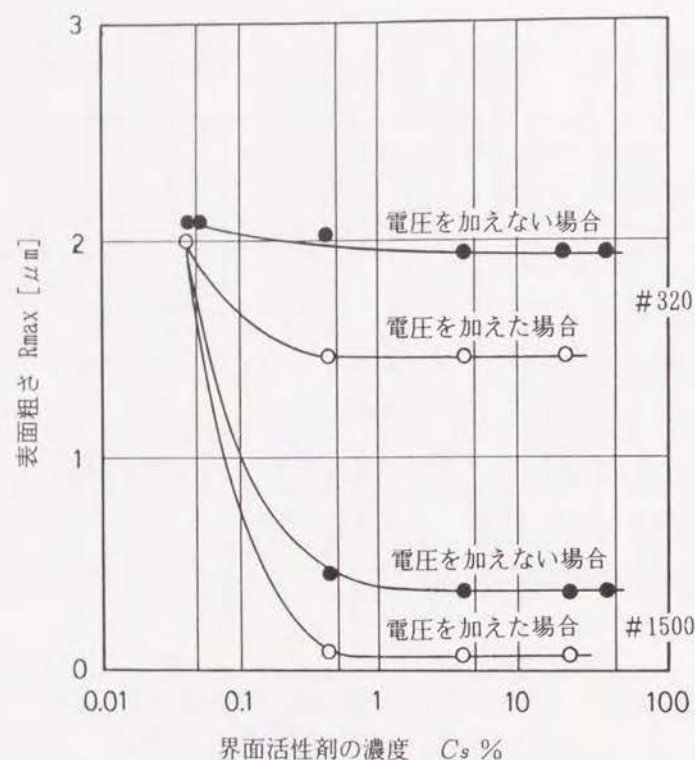


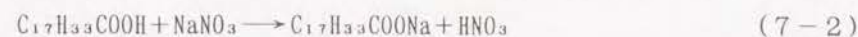
図7-5 界面活性剤の濃度と表面粗さの関係
(JIS2種純Ti, 1%aq. NaNO₃, $V_g=10[V]$)

[N/m]であるが、1%のNaNO₃水溶液に脂肪酸界面活性剤を微量添加すると、表面張力は約 25×10^{-3} [N/m]まで小さくなる⁵⁸⁾。したがって界面活性剤を添加することにより、電解液が砥粒とTiの素地との接触域に浸透しやすくなり、擦過にともなう温度上昇が抑制されて砥粒が損耗しにくくなることと、電解による生成物および砥粒擦過による切り屑が分散されて7-2節で述べた付着物が付きにくくなるために、表面粗さは若干良くなる。しかし、表面にはむしれが生じて連続的な擦過条痕が形成されないため、界面活性剤を添加した加工液を用いるだけでは鏡面にはできない。

一方、ギャップ電圧 V_g を印加した場合、表面粗さは界面活性剤の濃度 C_s が1%まで急激によくなり、表面のむしれと研磨材の目詰まりもなくなった。このように界面活性剤を添加した電解液を用いてギャップ電圧 V_g を印加しながらTiを擦過すると、Tiの表面粗さは大きく改善される。

界面活性剤を構成する脂肪酸の分子は炭化水素CH₂が鎖状に連結された構造をもち、オレイン酸を例にとると、その化学式は C₁₇H₃₃COOH で表される。脂肪酸界面活性剤を

NaNO₃水溶液中に添加すると、脂肪酸の分子は電解液中のNa⁺イオンと結合して



で表される化学反応が生じる。式(7-2)においてC₁₇H₃₃COONaは非水溶性のNa塩で一般に金属石鹸と呼ばれ、電解液を作成する際に界面活性剤を添加すると液が濁る原因になる。またNa塩の金属石鹸が生じる際に余剰となった脂肪酸分子は、図7-6に示すようにTiの表面に吸着するものと考えられる。

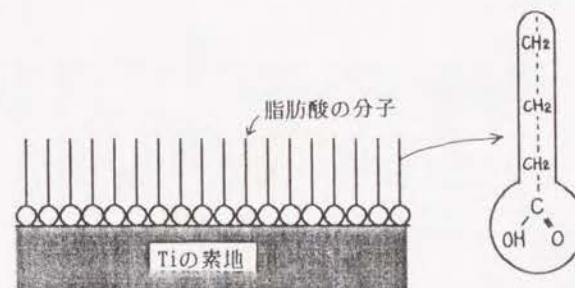


図7-6 脂肪酸分子の吸着状態

そこで電解液に界面活性剤を添加した場合と添加しない場合について電解反応の違いを調べてみた。1%のNaNO₃電解液に1%の脂肪酸界面活性剤を添加した場合と添加しない場合に測定されたギャップ電圧 V_g と定常電流 I_s 、電解加工による材料除去率 w の関係を比較して図7-7に示す。脂肪酸のように分子量の大きな化合物が電解液中にあっても定常電流 I_s 、材料除去率 w にはほとんど影響していないことが分かる。電解液中を電解電流 I が流れるのは電解質を構成するイオンの移動によるものであるが、イオンの大きさは脂肪酸の分子に比べて極めて小さいので、イオンは脂肪酸の分子間を通過できるものと思われる。また界面活性剤を添加した電解液を用いた場合でも、添加しない場合と同様に陽極の不動態化が生じ、表面に色のついた不動態化膜が生成された。

粒度#1500のパフ研磨材を用いてTiの電解パフ複合加工を行った場合に得られた表面を図7-8に示す。界面活性剤を添加した電解液を用いて電解パフ複合加工を行うことにより、Tiを図7-9に示すように表面粗さ $R_{max} 0.05 [\mu m]$ の鏡面に仕上げる事ができた。

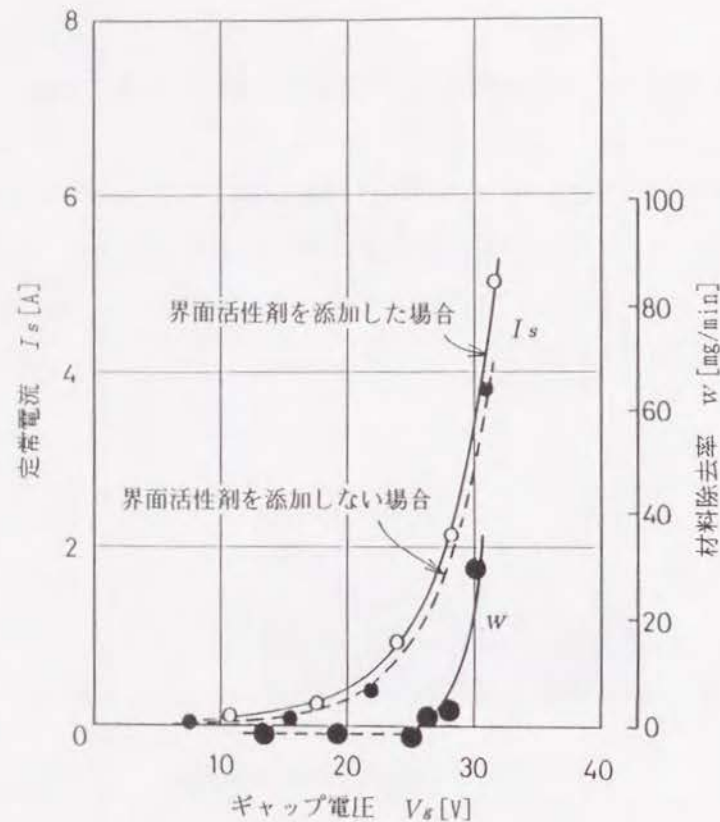


図7-7 界面活性剤の有無によるギャップ電圧と定常電流、材料除去率の関係の比較
(JIS2種純Ti, 1%aq. NaNO₃, N_R=630[rpm])



図7-8 Tiの鏡面加工面

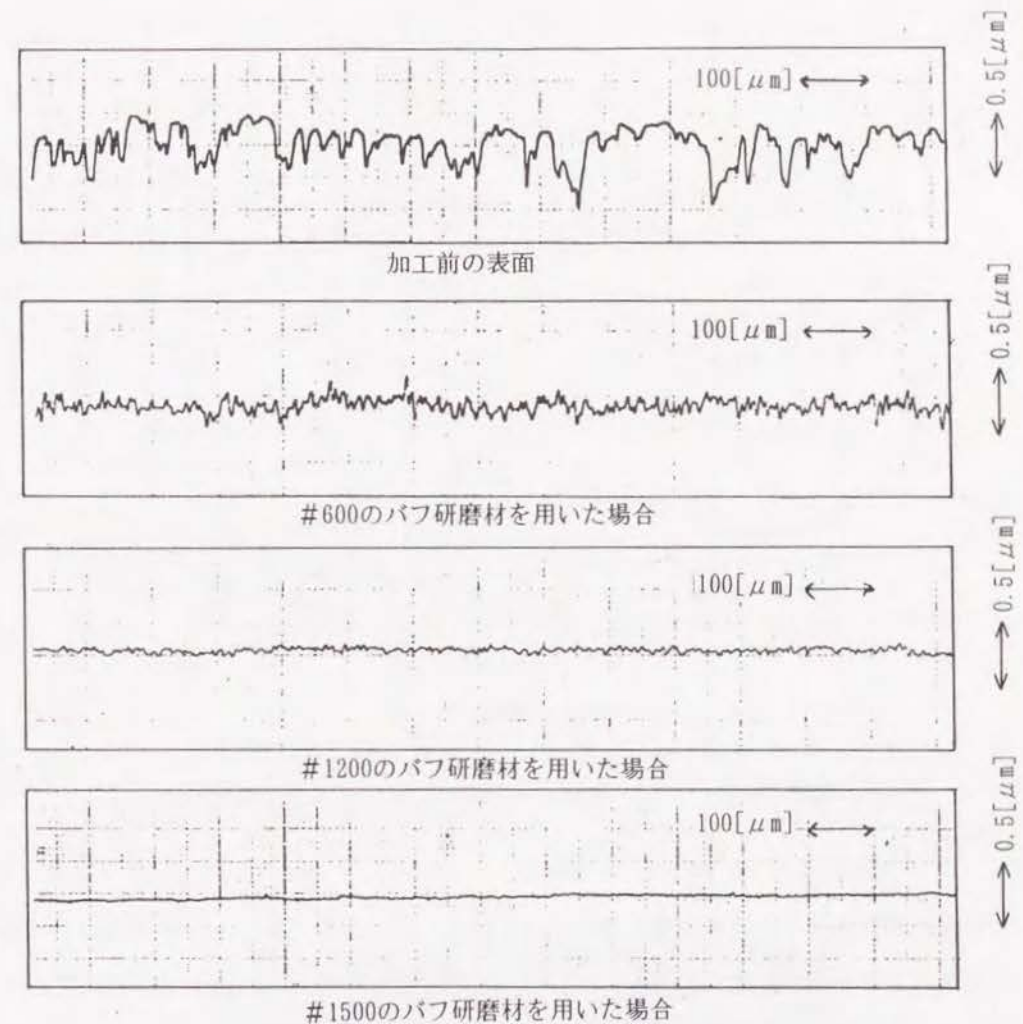


図7-9 電解パフ複合加工で加工されたTiの表面のプロフィール

7-4-2 表面粗さに影響を及ぼす加工因子

パフ研磨材の砥粒の粒度を変えてTiの加工を行った場合に測定されたギャップ電圧 V_g と表面粗さの関係を図7-10に示す。ギャップ電圧 $V_g=3$ [V] 付近まで表面粗さは急激に良くなり、その後 $V_g=約25$ [V] までは砥粒の粒度によって決まる一定値になっているが、 $V_g=25$ [V] を越えると表面粗さは再びわるくなった。表面粗さが良くなるギャップ電圧 $V_g=3$ [V] から25[V] の領域は第3章の3-3-1で分かったようにTiが不動態化する領域であり、電解加工の場合にはTiの表面にギャップ電圧 V_g が高くなるに伴

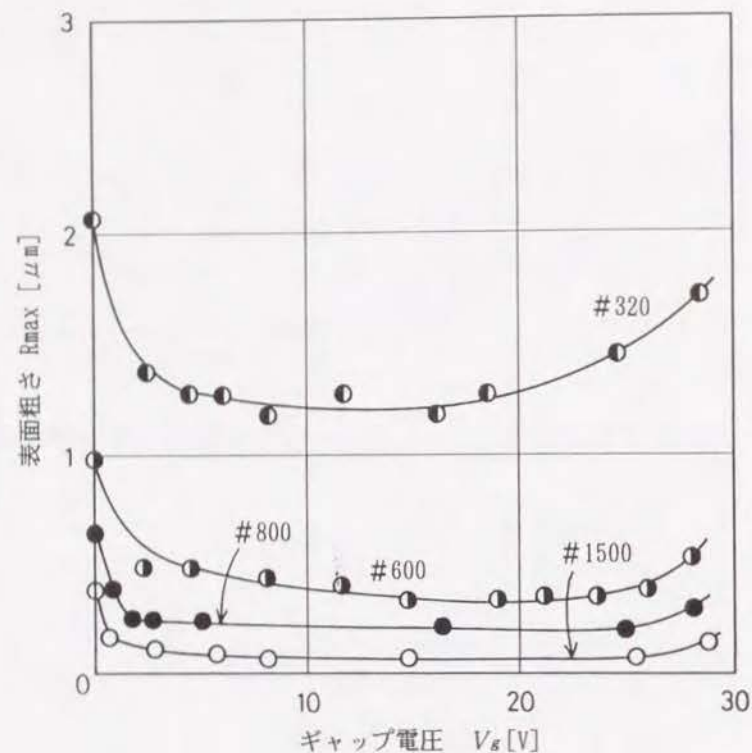


図7-10 ギャップ電圧と表面粗さの関係
(JIS2種純Ti, 1%aq. NaNO₃, $N_s=630$ [rpm], $V_f=170$ [mm/min])

って表面の色が濃くなる不働態化膜が生成される。不働態化が生じる電解条件の下でTiの電解バフ複合加工を行った場合、表面は色の変化がみられ、色はギャップ電圧 V_g が高くなって不働態化膜の膜厚 h_f が増すほど濃くなった。

また図7-11に示すように表面粗さは研磨材の砥粒の粒度が大になるにつれて良くなった。表面粗さ $R_{max} 0.3[\mu m]$ に加工しようとする場合、研磨材の粒度はバフ研磨材加工では粒度 #1500程度、電解バフ複合加工では粒度 #600程度のものを用いればよいことになる。しかし実際にこれらの条件で加工を行うと、バフ研磨材加工の場合と電解バフ複合加工の場合では表面の光沢はかなり異なった。バフ研磨材加工による表面は鈍い銀灰色で、光沢はなかった。これは表面に図7-3で示したような連続性のない擦過条痕が形成されて、かつむしれが生じたためである。電解バフ複合加工による表面は不働態化膜が生成されるために淡い茶色の面になったが、光沢があった。図7-12は電解バフ複合加工で加工された表面の金属顕微鏡写真であるが、擦過条痕は連続的に形成され、むしれもほとんどないことが分かる。

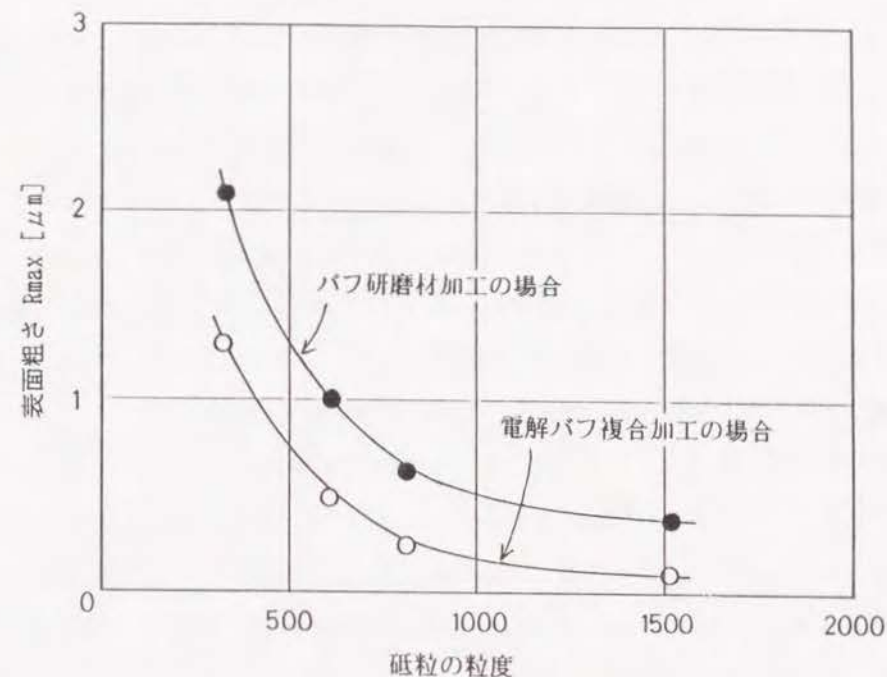


図7-11 砥粒の粒度と表面粗さの関係
(JIS2種純Ti, 1%aq. NaNO₃, $N_s=630$ [rpm], $V_f=170$ [mm/min])



図7-12 電解バフ複合加工で加工されたTiの表面

7-4-3 Tiの加工能率

砥粒の粒度#1000のパフ研磨材を装着した回転円盤型の複合工具電極で、純Ti 2種の加工を行った場合に測定された、ギャップ電圧 V_g と材料除去率 w の関係を図7-13に示す。ギャップ電圧 $V_g=0$ [V]のデータはパフ研磨材加工のみによる場合を示すが、このときの材料除去率 w は10[mg/min]程度であった。ギャップ電圧 V_g を増加させていくと、材料除去率 w はギャップ電圧 V_g に比例して増大し、複合工具電極の回転数 $N_B=635$ [rpm]の場合、ギャップ電圧 $V_g=15$ [V]で材料除去率は $w=50$ [mg/min]まで高められた。また図7-14は加工中に測定された電解電流 I とギャップ電圧 V_g の関係を示し、電解電流 I もギャップ電圧 V_g に比例して増加することが分かった。

第3章の3-3-1で述べたように、ギャップ電圧 $V_g=25$ [V]以下の領域はTiの不動態化域であり、電解加工のみではTiを除去することはできない。電解パフ複合加工でTiの加工を行なった場合に、不動態化の電解条件であるにもかかわらず材料除去率 w がギャップ電圧 V_g に比例して増大したのは、Tiの表面に生成された不動態化膜が砥粒の擦過作用で除去されて、この部分が陽極溶出したためである。

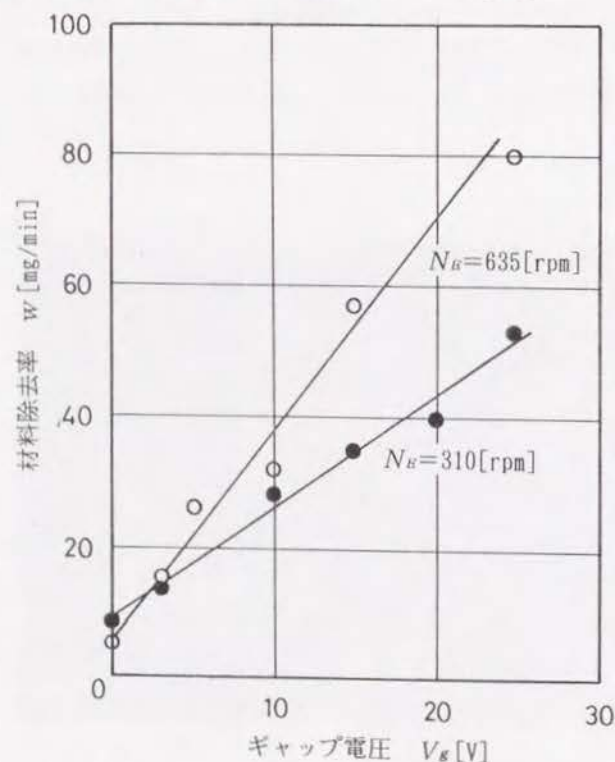


図7-13 電解パフ複合加工で純Ti 2種を加工した場合のギャップ電圧と材料除去率の関係
(JIS2種純Ti, 1%aq. NaNO_3 , $V_f=500$ [mm/min], #1000パフ研磨材)

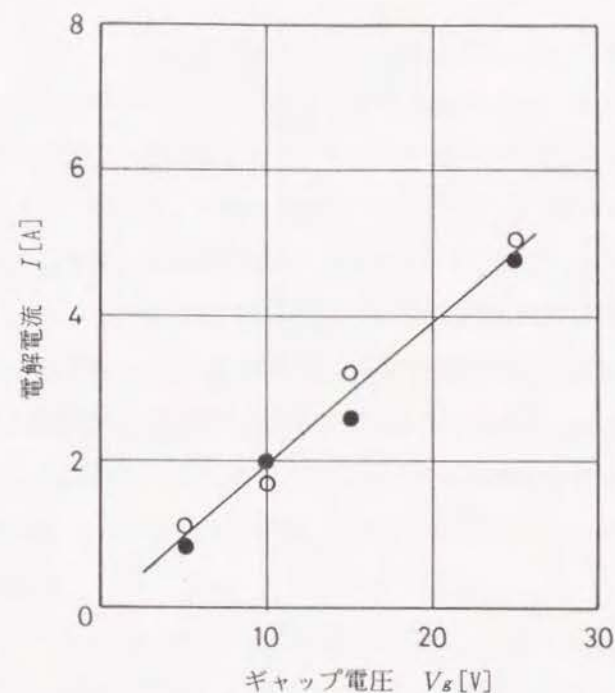


図7-14 電解パフ複合加工で純Ti 2種を加工した場合のギャップ電圧と電解電流の関係
(JIS2種純Ti, 1%aq. NaNO_3 , $V_f=500$ [mm/min], #1000パフ研磨材
● $N_B=310$ [rpm], ○ $N_B=635$ [rpm])

7-5 結論

砥粒加工では鏡面にすることが困難といわれているTiを電解パフ複合加工によって鏡面加工するために、Tiを加工する際に生じる砥粒の損耗、研磨材の目詰まりの原因について検討し、界面活性剤を添加した電解液を用いた電解パフ複合加工によるTiの加工実験を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 水を浸したパフ研磨材でTiを擦過すると、砥粒の損耗、脱落が生じて、かつ不織布の繊維組織が目詰まりする。加工されたTiの表面は、擦過条痕が途切れ途切れに形成されて連続性がなく、かつ随所にむしろ非水溶性でかつ粘着性のTiの水酸化物が付着する。これらは擦過する際の温度上昇と、温度上昇によってTiの化学的活性が高められて砥粒との接触域で化学反応が生じるためである。
- (2) Tiをパフ研磨材で加工するためには、砥粒とTiの接触域に浸透しやすい加工液を用い、かつTiの表面に化学的に安定な保護膜を生成してTiの水酸化物が生成する

のを抑制することが有効である。

- (3) 電解液に界面活性剤を添加した加工液を用いてTiをバフ研磨材加工すると、電解液が砥粒とTiの素地との接触域に浸透しやすくなるため、表面粗さは若干良くなるが、表面にはむしれが生じ、バフ研磨材の損耗も著しい。ギャップ電圧 V_g を加えた場合には、界面活性剤を1%程度添加することにより、表面粗さは急激に良くなり、表面のむしれと研磨材の目詰まりがなくなった。
- (4) 界面活性剤を添加した電解液を用い、不動態化が生じる電解条件でTiを電解バフ複合加工すると、砥粒の粒度#1500のバフ研磨材を用いた場合に表面粗さ R_{max} $0.05[\mu m]$ の鏡面に仕上げる事ができた。

第8章 Alの鏡面加工

8-1 緒 論

Alが工業材料として利用され始めたのは19世紀になってからであり、その歴史はFe、Cuなどに比べると極めて新しい。しかし現在ではAlはFeに次いで2番目に使用量の多い金属であり、その用途は日用品、建装材、構造材料、電気製品、輸送機械など多方面に及んでいる。Alは軽量で電気および熱の伝導率が高く、光の反射率が高いなど優れた特徴を有する。またAlは展性、延性に優れているため、従来からプレスによって成形加工される製品に多く用いられてきたが、研削加工のような除去加工で製品が作られることはそう多くなかった。

しかし近年、レーザー光を利用した製品の開発が進むにつれて、低価格で性能の良い反射鏡部品用にAlが盛んに用いられるようになった。また磁気ディスク記憶装置の基板(サブストレート)や乾式複写機の感光体ドラムのような高い加工精度が必要な部品にもAlが用いられている。これらの部品に用いられるAlは鏡面加工される。例えばポリゴンミラーは、摺動部分に空気軸受けを用いた精密フライス盤を用いて単結晶ダイヤモンド工具によって切削加工されている。この加工法によると形状精度、表面粗さともに優れたAlの鏡面加工が行えるが設備費用が高く、しかも大量生産にはあまり向いていないことが短所である。

サブストレートの仕上げ加工は通常研磨加工で行われる。その加工工程は、前工程として基板の形状精度を確保するためにカップ砥石を用いた研削加工が行われている。さらにラッピング加工で表面粗さを小さくするが、このラッピング工程は通常粒径の異なる砥粒を用いて複数の工程で行われる。したがって研磨加工でAlの鏡面加工を行うためには複数の加工装置を用いなければならず、工作物の着脱に手間がかかるばかりでなく、着脱時に粗大な浮遊粒子が付着するのを抑制するためにクリーンルームが必要になる。このようにAlを鏡面加工するには生産技術上いくつかの問題がある。

これらの問題を解決するために、電解バフ複合加工でAlを鏡面加工する方法について研究することとした。すなわち、例えば空気軸受けなどの高価な機械要素を用いず、普通精度の加工装置で、前工程から仕上げ加工までを1つの装置で行えるような鏡面加工技術を確立しようとするにある。電解バフ複合加工でAlを鏡面加工する際に考慮せ

ねばならないのは、電解によって陽極の工作物の表面に生成される不働態化膜の性質である。後述するようにAlは電解によって容易にポーラスな不働態化膜が生成され、生成条件によってはその膜厚 h_w は数 $[\mu\text{m}]$ に達することもある。不働態化膜の膜厚 h_w が砥粒の粒径 d_a に比べて厚いと、砥粒の擦過によって不働態化膜の厚さ全体を除去することができず、素地が露出されない。またポーラスな不働態化膜が存在すると表面で光の散乱が生じやすいため、光の反射率が低下して光学部品として利用できなくなる。

そこでまずAlの不働態化膜の特徴について検討し、次に電解バフ複合加工によってAlを鏡面加工する実験を行うこととした。

本章の構成は次のようになっている。8-2節ではAlの不働態化膜の特徴について検討し、8-3節では実験装置と方法について述べ、8-4節では実験結果について述べ、それらを考察する。8-5節は以上をまとめた結論である。

8-2 Alの不働態化膜の特徴

図8-1に示すように不働態化膜が生成されている工作物の表面を砥粒で擦過する場合を考える。現在市販されている砥粒の中で除去加工用として安価に入手でき、しかも扱いが容易なのは粒径 d_a が $1[\mu\text{m}]$ 以上のものである。それに対し第5, 6, 7章で述べたステンレス鋼、炭素鋼、Tiの不働態化膜の膜厚 h_w は数 $0.01[\mu\text{m}]$ から数 $0.1[\mu\text{m}]$ であった。

ステンレス鋼、炭素鋼、Tiを擦過する場合、これらの不働態化膜の膜厚 h_w は通常使用される砥粒の粒径 d_a に比べて小さいので、 $d_a > h_w$ となる。したがって同図(a)に

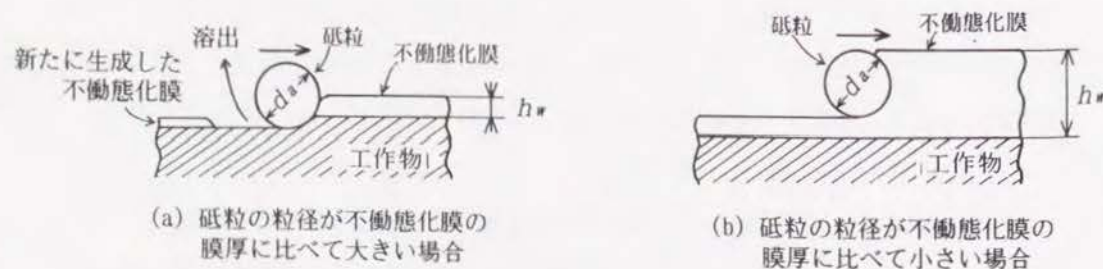


図8-1 砥粒の粒径と不働態化膜の膜厚の関係が擦過作用に及ぼす影響

示すように、表面は砥粒で擦過されると砥粒のくい込みで不働態化膜と工作物の素地の一部が除去され、砥粒が擦過した後に工作物の素地が露出する。ギャップ電圧 V_g が印加されている場合には、露出した部分は電解によって陽極溶出し、同時に不働態化膜が生成される。

逆に、不働態化膜がきわめて厚く $d_a < h_w$ の場合 (同図(b))、砥粒のくい込みは工作物の素地まで達せず、擦過作用によって素地は露出しない。また不働態化膜の膜厚 h_w の成長速度が砥粒の平均擦過間隔 t_a に比べて極めて大きい場合にも、砥粒の擦過作用で素地を露出させることはできない。

Alの不働態化膜の生成過程と膜の構造は多くの研究によって相当明らかになっている⁵⁷⁾。これらの研究によるとAlを陽極にして直流電解を行った場合、Alの不働態化膜の構造は電解液の種類によって変わる。電解液として H_3BO_3 、 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ などの中性塩の水溶液を用いた場合には、バリアー層といわれる薄くて緻密な不働態化膜が表面に生成される。 H_2SO_4 、 H_3PO_4 などの酸性水溶液を用いた場合には、図8-2に示すようにバリアー層の上にポーラス層と呼ばれる細孔を有する不働態化膜が生成される⁵⁷⁾。ポーラス層に細孔が形成される機構を説明するのは容易ではなく諸説があるが、バリアー層の一部が電気化学的に溶解して溶け残ったバリアー層が次々と孔壁を作りながら成長するといわれる⁵⁸⁾。このポーラス層は時間の経過につれてその膜厚 h_w が増すことが特徴で、Alの耐食性を高めるために行われる陽極酸化処理では数 $[\mu\text{m}]$ の膜厚 h_w のポーラス層を有する不働態化膜を生成させている。

酸素酸塩型の電解液を用いた場合にポーラス型の不働態化膜が生成されるかどうかは明かでないが、酸性の電解液の場合と同様な不働態化膜が生成されると、図8-1(b)のような状態になり、砥粒の擦過による不働態化膜の除去と電解による陽極溶出が繰り返

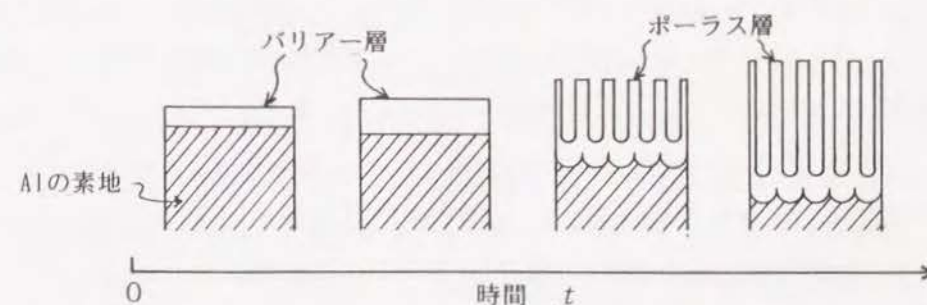


図8-2 Alの不働態化膜の説明図

されなくなって電解バフ複合加工を行えなくなる。

以上のように電解バフ複合加工でAlを鏡面加工するためには、ポーラス層が生成しないようにすることが必要である。そのためには

- (1) 工作物と複合工具電極の相対速度を大きくする。
 - (2) バフ研磨材としては比較的砥粒密度 m_s の大きいものを用いる。
 - (3) バリヤー層の表面に何らかの保護膜を生成させてポーラス層の生成を抑制する。
- 方策が必要である。このうち(1), (2)は砥粒の平均擦過間隔 t_s を短くすることによって得られる。また(3)は第7章の7-2節で述べた界面活性剤の吸着効果を利用することによって達成できる。

そこで第7章の7-3で述べたTiの加工を行う場合と同様に、界面活性剤を添加した電解液を用いて電解バフ複合加工によるAlの加工実験を行うこととした。

8-3 実験装置と方法

実験装置は回転円盤型の複合工具電極を用いた平面の加工を行う場合と同様に、第3章の図3-1に示したNCフライス盤に搭載したものを用いる。電解液は1%の NaNO_3 水溶液に脂肪酸界面活性剤を添加したものを用いる。

加工実験は、はじめにAlが不働態化するギャップ電圧 V_g を調べるために電解加工のみの実験を行う。次にバフ研磨材の擦過作用を複合させて工作物を加工し、ギャップ電圧 V_g 、工作物と砥粒の相対的な運動、砥粒の大きさが表面粗さに及ぼす影響を調べる。

8-4 実験結果と考察

まずAlが不働態化するギャップ電圧 V_g を調べるために、電解液を入れたビーカーの中にAlとCuの板を対向させて浸して加工実験を行った。電解液に酸素酸塩型の0.1% NaNO_3 水溶液を用いて直流電解を行った場合に測定されたギャップ電圧 V_g と電解電流 I の関係を調べた結果を図8-3に示す。Alを直流電解した場合、電解電流 I は約18[V]以上のギャップ電圧 V_g では急激に増加した。Alの分解電圧 V_o の値はステンレス鋼や炭素鋼の値に比べてかなり高く、Alと同様に不働態化しやすいTiの値 (25[V]) に近い。ギャップ電圧 V_g が分解電圧 V_o より小さい範囲において、陰極からは水の電気分解による H_2 が生じるが、陽極のAlの表面では O_2 の気泡が生じたがAlの溶出は生じなかった。

加工終了後Alを水洗いして乾燥させて表面を調べたところ、ギャップ電圧 V_g が分解電圧 V_o より小さい場合には、電解液に浸された部分は浸されていない部分に比べて表面がややくもっていた。くもりが生じた原因を調べるために触針式の表面粗さ計で表面のプロフィールを測定したところ、電解液に浸された部分と浸されていない部分に表面粗さの差はなく、くもりは表面で光が散乱して生じたものではない。また工作物を折り曲げても塗膜のようにくもりが剝離することもなかった。

したがってくもりは電解によってAlの表面に不働態化膜が生成されているためではないと思われる。

なお図8-3においてギャップ電圧 V_g が分解電圧 V_o より大きい場合 (過不働態化域) にはAlの陽極溶出が生じた。陽極溶出した表面は、局所的な溶出によって生じた溶出痕が全面に形成され、かつ容易に擦り取ることができる灰色の粉末が付着していた。

この実験結果を基にしてAlの不働態化域はギャップ電圧 V_g が18[V]以下の領域にあると考え、粒径の異なる3種類のバフ研磨材を用いて加工を行った。その結果得られたギャップ電圧 V_g と表面粗さの関係を図8-4に示す。表面粗さはギャップ電圧 V_g が1~3[V]の範囲で最も良くなり、この電圧範囲が適正な電圧条件であることが分かった。ギャップ電圧 V_g の違いによる表面の状態の違いを比較すると、ギャップ電圧 V_g が1~3[V]の場合、図8-5に示すように砥粒の擦過によってできる擦過条痕の凹凸で表面粗さが形成されており、表面はAl特有の光沢面になった。

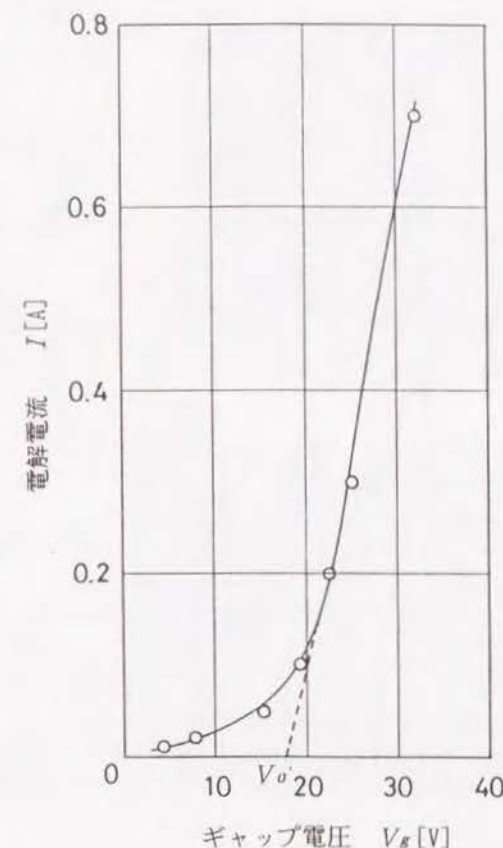


図8-3 Alのギャップ電圧と電解電流の関係
(Al1050, $A_e=28.8[\text{cm}^2]$, 0.1%aq. NaNO_3)

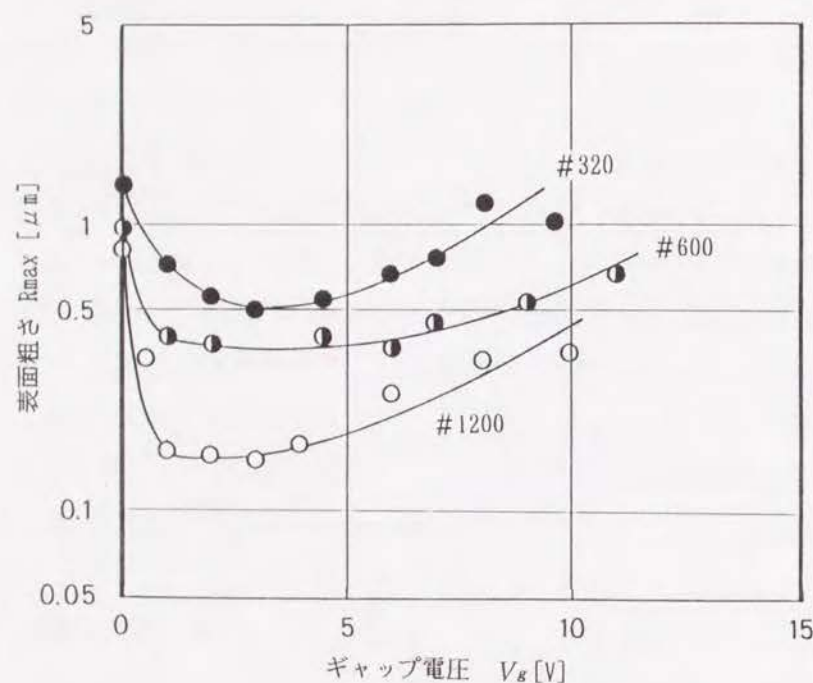


図8-4 電解バフ複合加工でAlを加工した場合のギャップ電圧と表面粗さの関係
(Al1050, $A_e=28.8[\text{cm}^2]$, 0.1%aq. NaNO_3 , $N_s=625[\text{rpm}]$, $V_f=200[\text{mm/min}]$)



図8-5 ギャップ電圧 $V_g=1\sim3[\text{V}]$ で加工した場合のAlの表面

ところが $V_g=0[\text{V}]$ の電圧を加えない場合には、表面の光沢はなく全体的にくもった表面になった。図8-6(a)はギャップ電圧 $V_g=0[\text{V}]$ で加工を行った場合の表面の光学顕微鏡写真であるが、擦過条痕の識別が困難なほど表面が荒れている。

この表面を電子顕微鏡で観察すると、同図(b)のように擦過条痕が付着物で覆われているのが分かった。

そこでくもりの原因を調べるためにギャップ電圧が $V_g=0[\text{V}]$ で加工された表面と、 $V_g=2[\text{V}]$ で加工された表面のAl, O, Cの深さ方向の濃度分布をオージェ電子分光法で調べたところ、図8-7の結果が得られた。同図(a)はギャップ電圧 $V_g=2[\text{V}]$

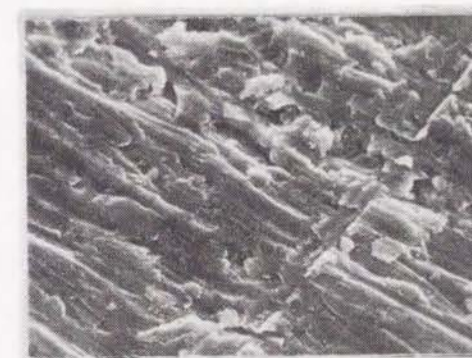
で加工された表面の分析結果であり、表面から深さ方向へのOの分布状態から考えて、表面は約 $0.12[\mu\text{m}]$ まで薄いバリアー層の不働態化膜が生成されていることが分かる。また同図(b)は $V_g=0[\text{V}]$ の場合の表面であるが、Oが約 $0.6[\mu\text{m}]$ とかなり厚い酸化膜が生成されている。このOはAlの酸化物として存在している⁵⁹⁾。

このような酸化物が生じる原因としてはAlが砥粒で擦過される際の温度上昇によって常温では生じ難い化学反応が生じることが考えられる。すなわち砥粒の擦過によって生じる温度上昇は第4章の図4-15に示したように、粒径 $10[\mu\text{m}]$ の砥粒が $2[\text{m/s}]$ の速度で移動する場合、Alと砥粒の接触域では約 $50[^\circ\text{C}(\text{K})]$ である。

Alを熱水中に浸すと式(8-1)であらわされるアルミナ水和物が表面に生成される⁶⁰⁾。



(a) 光学顕微鏡でみた表面



(b) 電子顕微鏡で見た表面

図8-6 ギャップ電圧 $V_g=0[\text{V}]$ で加工した場合のAlの表面

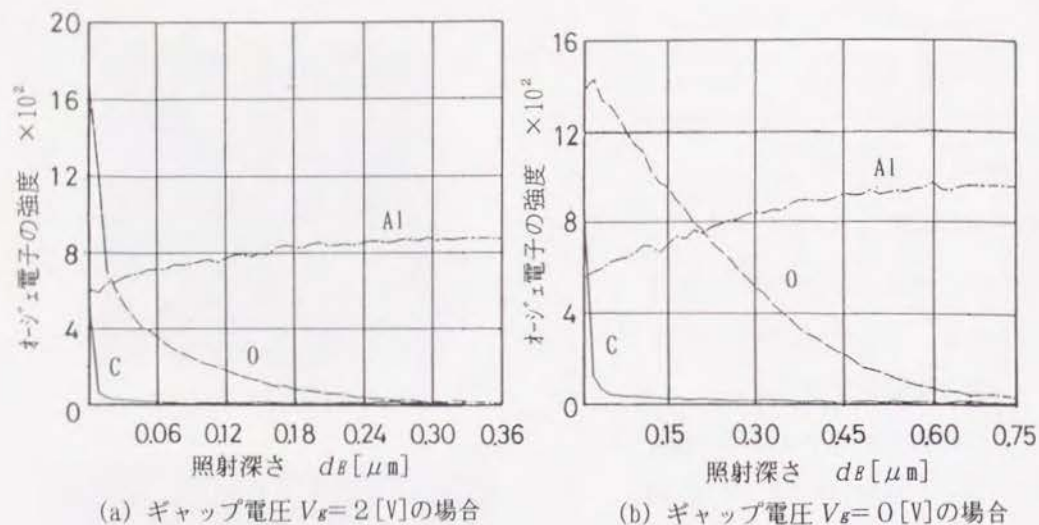


図8-7 電解バフ複合加工で加工されたAl表面のAl, O, Cの深さ方向の分布



(8-1)

$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ はペーマイト皮膜といわれ、温度が高くなるほど膜の成長速度が速い。ペーマイト皮膜は70[°C]程度の水温においても生成されることから、ギャップ電圧 $V_g = 0$ [V] で加工された表面にはこのペーマイト皮膜が砥粒の擦過にともなう温度上昇で生成されたのではないかと考えられる¹¹⁾。

したがって表面が荒れる原因は、前述の図7-2で示したように、温度上昇による化学反応で生成された $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ が工作物の表面に付着することと、砥粒にこの生成物が付着して、正常な砥粒の切刃形状が工作物に転写されにくくなったためと思われる。

次に加工能率について調べたところ、図8-8に示すギャップ電圧 V_g と材料除去率 w の関係が得られた。材料除去率 w はギャップ電圧 V_g の増加に対して $V_g = 2$ [V] 付近まではいったん減少するが、2 [V] を越えると再び増加した。

材料除去率 w が小さくなるギャップ電圧 $V_g = 2 \sim 3$ [V] の領域は前述のように表面粗さが最も良くなる条件である。この領域では電解によって表面に緻密なバリアー層からなる不動態化膜が生成されるために砥粒のくい込みが抑制され、陽極溶出は不動態化膜が除去された局所でのみ生じているものと思われる。なおギャップ電圧 V_g が2 [V] を越えると材料除去率 w が増加するのは陽極溶出が生じるためである。

次にギャップ電圧 V_g が2～3 [V] の領域において複合工具電極の回転数 N_E と工作物の送り速度 V_f が表面粗さに及ぼす影響を調べた。その結果を図8-9に示す。表面粗

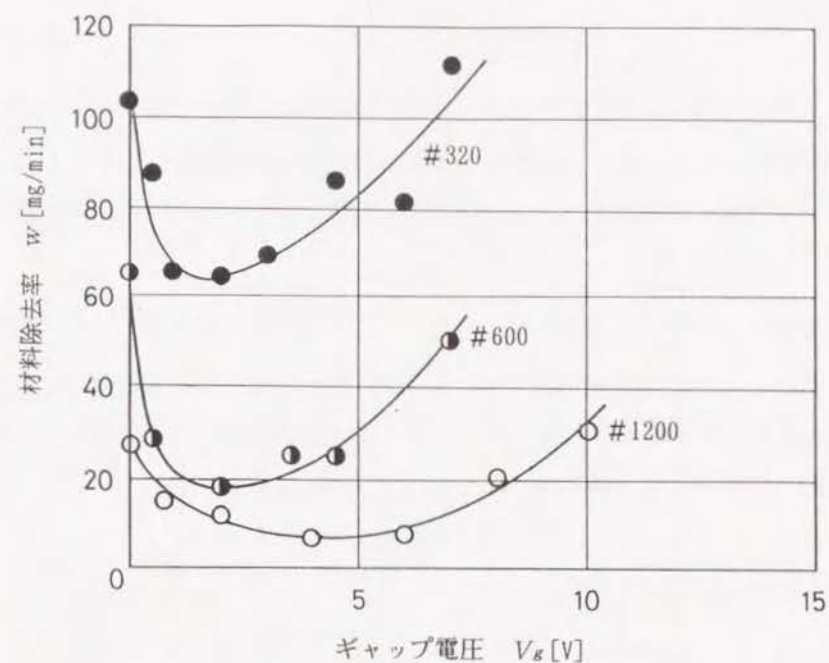


図8-8 電解バフ複合加工でAlを加工した場合のギャップ電圧と材料除去率の関係 (Al1050 , $A_e = 28.8 [\text{cm}^2]$, $0.1\% \text{aq. NaNO}_3$, $N_E = 625 [\text{rpm}]$, $V_f = 200 [\text{mm/min}]$)

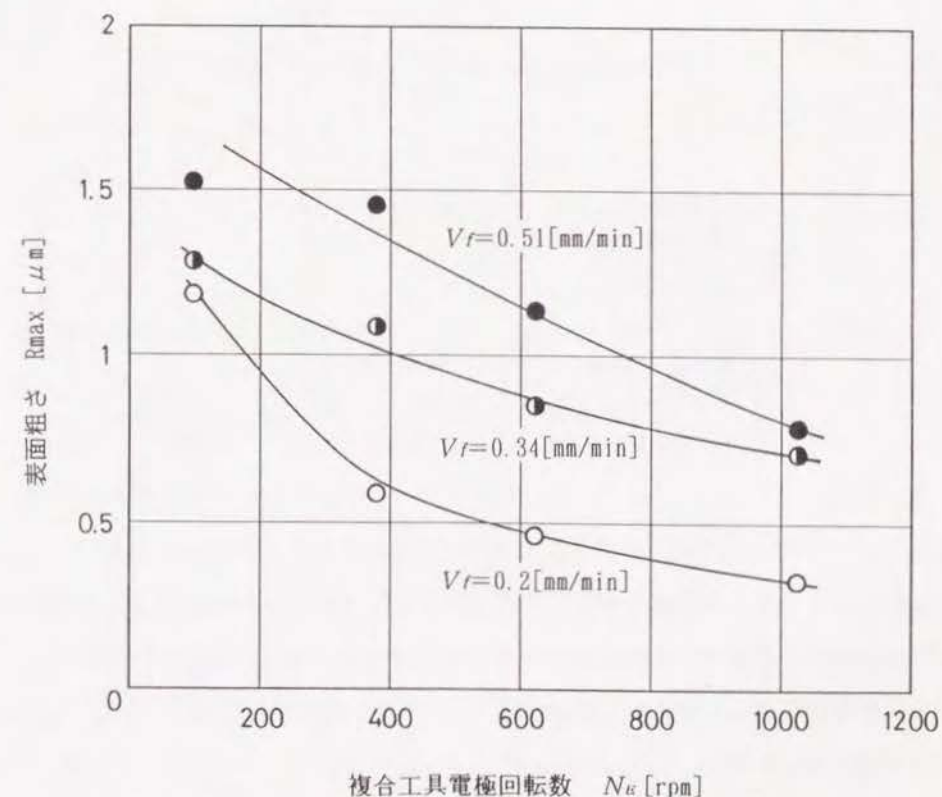


図8-9 Alを加工した場合の複合工具電極の回転数と表面粗さの関係 (Al1050 , $A_e = 28.8 [\text{cm}^2]$, $0.1\% \text{aq. NaNO}_3$, #320バフ研磨材)

さは複合工具電極の回転数 N_E の増加につれて良くなった。複合工具電極の回転数 N_E が低い場合に表面粗さがわるくなるのは、複合工具電極の1回転当たりの工作物の送り f が大きくなるため、擦過条痕同士の間隔が広がって、形成される凹凸が大きくなったことによるものと思われる。

図8-9を送り f と表面粗さの関係として表すと、図8-10のようになる。図中の黒丸は第5章の5-4-2で述べたステンレス鋼の場合の送り f と表面粗さの関係を示す。複合工具電極1回転当たりの送り f が同じ場合Alの表面粗さはステンレス鋼に比べて、Alの方が材料自体が軟らかいため約2倍わるくなっている。

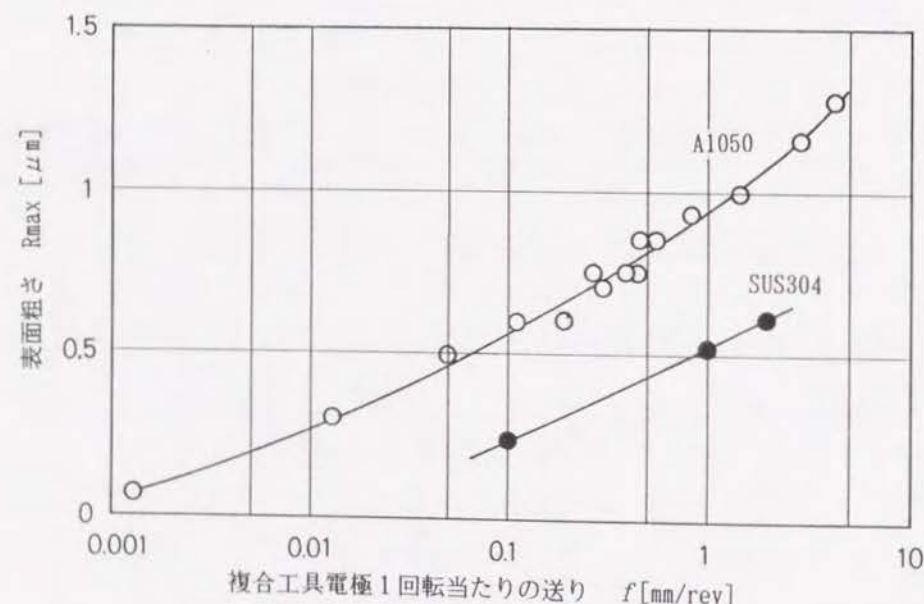


図8-10 複合工具電極1回転当たりの送りと表面粗さの関係
(A1050 & SUS304, $A_e=28.8[cm^2]$, #320バフ研磨材)

しかしグラフの傾きはAlとステンレス鋼ではほぼ同じであり、このことからAlの場合材料が軟らかい分だけ表面粗さがわるくなるものの、ステンレス鋼の場合と同様に基本的には工作物上に形成される擦過条痕で表面粗さが生成されていることが分かる。

さらに砥粒の粒径 d_a を変えて加工を行って得られた表面粗さを図8-11に示す。表面粗さは粒径 d_a が小さくなるとともに良くなった。

より粒径の細かい砥粒を用いた場合の表面粗さについては、木本らが行った実験結果によると、粒径 $2[\mu m]$ の砥粒を用いた場合の表面粗さは $R_{max} 0.02[\mu m]$ まで良くなると

いう結果が得られており、Alが不動態化するギャップ電圧 V_g においてはポーラス層が成長するのに要する時間は砥粒の平均擦過間隔 t_a に比べて遅いか、ポーラスの不動態化膜が生成し難い状態になっていると思われる³⁹⁾。

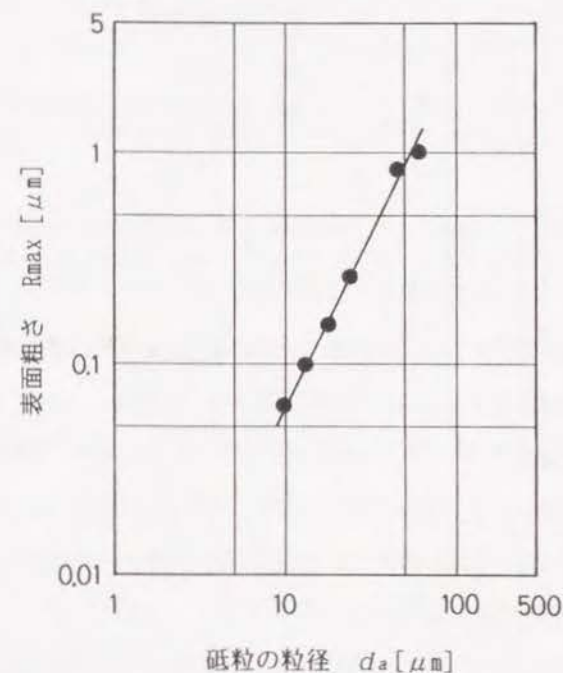


図8-11 砥粒の粒径と表面粗さの関係
(A1050, $A_e=28.8[cm^2]$, #320バフ研磨材)

次に形状精度に対する影響を調べるために、第5章の5-3で述べた2個の電気マイクロメータで構成した除去深さ h_z の測定機を用いて、加工後の除去深さ h_z の変化のパターンを測定した。

工作物として太陽光線の反射鏡パネルを作製することを目的として、幅200[mm]、長さ300[mm]、厚さ0.5[mm]の工業用純Al A1050の圧延板を用いた。この材料を直径 $D_E=220$ [mm]の回転円盤型複合工具電極を用いて電解バフ複合加工を行った場合に測定された、除去深さ h_z と複合工具電極中心からの距離 y の関係を図8-12に示す。工作物の送り速度 V_f を変えて加工を行なうと、 $V_f=250[mm/min]$ 、 $V_f=500[mm/min]$ のいずれの場合も除去深さ h_z は複合工具電極中心 ($y=0$) の位置が盛り上がった中凸パターンになった。

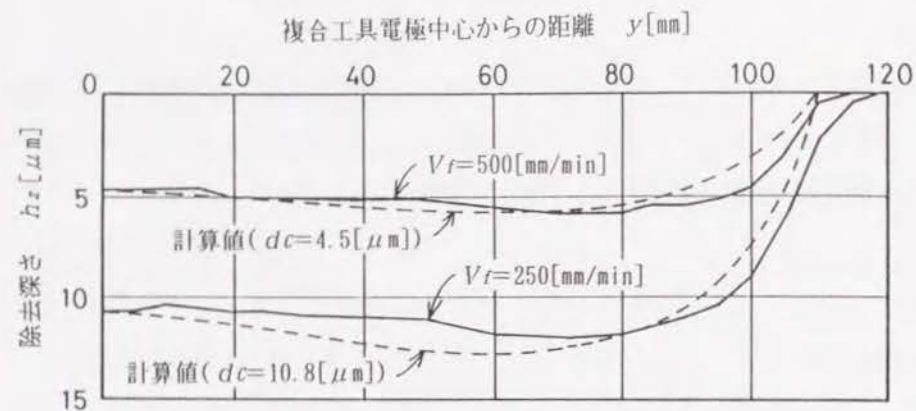


図8-12 電解バフ複合加工でAlを加工した場合の除去深さの分布パターン
(Al1050, 1%aq. NaNO₃, $N_s=380$ [rpm], $R_s=110$ [mm])

このパターンが第5章の5-4-5で述べた作用砥粒数 $M_{\#y}$ の違いによるものかどうかを調べるために、測定された中心での除去深さ d_c を基準にして、第5章の図5-25の無次元化された除去深さのパターンから除去深さ h_z のパターンを推定すると、図8-12の点線のようにになる。この結果により推定された除去深さ h_z のパターンと測定結果はよく一致しているので、Alを加工する場合も形状精度は作用砥粒数 $M_{\#y}$ の分布によって決定されることが分かった。

図8-13は電解バフ複合加工で鏡面加工された工業用純Al A1050の外観を示し、表面粗さは図8-14に示すように $R_{\max} 0.05[\mu\text{m}]$ 前後に仕上げられている。

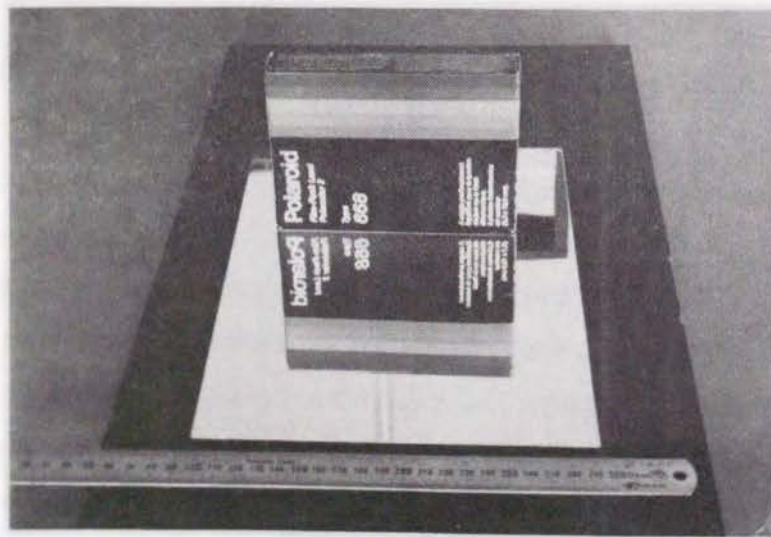


図8-13 電解バフ複合加工で鏡面加工された工業用純Al A1050の外観

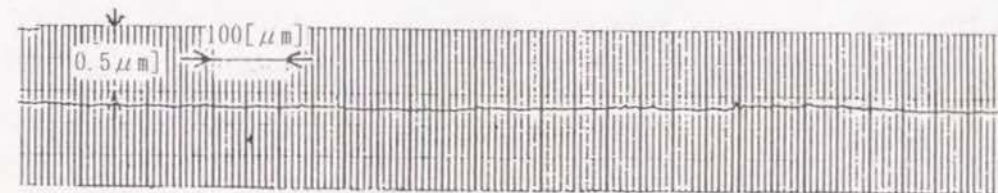


図8-14 電解バフ複合加工で加工されたAlの表面のプロフィール

8-5 結 論

Alの不動態化膜の特徴について検討し、電解バフ複合加工によるAlの鏡面加工実験を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) Alの不動態化膜はステンレス鋼、炭素鋼、Tiの不動態化膜に比べてかなり膜厚 h_w が厚い。とくにポーラスな不動態化膜が生成すると表面での光の反射率が低くなるばかりでなく、砥粒の擦過による素地の除去が行えなくなる。
- (2) 脂肪酸界面活性剤を添加した酸素酸塩型の電解液を用いて直流電解を行った場合、Alはギャップ電圧 V_g が18[V]以下で不動態化する。
- (3) 電解バフ複合加工によりAlが不動態化するギャップ電圧 V_g で加工すると、表面にくもりは生じず、砥粒の擦過条痕による均一な凹凸面になる。
- (4) 表面粗さは不動態化のギャップ電圧 V_g で加工を行った場合に最も良くなる。この電圧条件の場合、ポーラスな不動態化膜はあまり生成されず、表面粗さは砥粒の粒径と擦過軌跡で決まる。

第9章 Cuの鏡面加工

9-1 緒 論

Cuは我々の日常生活においてFe, Alと並んで多用されている金属材料の一つである。Cuは電解精錬によって純度99.96%以上の銅地金が作られ、この銅地金を再熔融処理して酸素量を調整したものが工業用の純Cuである。工業用純Cuは再熔融処理の仕方によりタフピッチ銅 (C1100)、リン脱酸銅 (C1201, C1220, C1221)、無酸素銅 (C1020) などがあり、いずれもCuの純度は99.7%以上である⁶²⁻⁶³⁾。これらの工業用純Cuは熱伝導率と電気伝導率が高いことおよび化学的に安定なので、従来から導電材料、熱交換器、装飾品などに多用されている。またCuは、Al, Au, Agと並んで光の反射率が非常に高いので、近年ではAlと同様にレーザー光などの反射鏡に用いられることも多い。

このようにCuはさまざまな優れた特徴を有する反面、除去加工を行う上においては高い加工精度で加工することがきわめて困難な材料の一つである。たとえば無酸素銅を切削加工する場合、切削速度が低いと表面のむしれや工具への銅片の付着が生じ、高速で切削すると工具が急速に摩耗する⁶⁴⁾。また研削加工にいたっては同様な理由で砥粒切れ刃の目詰まりが著しいため、加工が困難である。したがって、現在生産加工としてCuの鏡面加工には単結晶ダイヤモンド工具を用いた精密切削が多用されている。このようにCuは、第8章で述べたAlと同様に鏡面加工を行なう上で生産技術上問題の多い材料である。

そこで、電解バフ複合加工でCuを鏡面加工する方法について研究することとした。まず、Cuの表面に生成される不動態化膜の性質についてであるが、Cuは空気中に長時間放置すると表面が次第に黒みを帯びて変色する。表面が変色したCuは腐食されにくく、表面に化学的に安定な保護膜が生成されていることが分かる。このような保護膜は酸素酸塩型の電解液を用いた直流電解でCuの表面を不動態化することによっても生成するのではないかと考えられる。しかし電解作用によってCuの表面に不動態化膜を生成することに関する研究はほとんど行われていない。

そこでまず酸素酸塩型の電解液を用いた電解でCuが不動態化するための電解条件について検討し、その結果に基づいて電解バフ複合加工によるCuの鏡面加工実験を行うこととした。

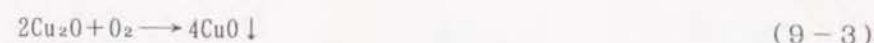
本章の構成は次のようになっている。9-1節ではCuの不動態化膜の特徴について検討し、9-2節では実験装置と方法について述べ、9-3節では実験結果について述べ、それらを考察する。9-4節は以上をまとめた結論である。

9-2 Cuの不動態化膜の特徴

Cuの表面に生成される不動態化膜の組成について考える。電解液中で陽極表面で生じる可能性が高い電気化学反応は、まず溶出した Cu^{2+} イオンと電解液中の OH^- イオンによる



が考えられる。 $\text{Cu}(\text{OH})_2$ は水酸化銅といわれ、電解液中に沈殿するので、Cuの表面に付着して不動態化膜にはなり得ない。もう一つの反応は表面が溶出して素地が露出状態になったCuが電解液中の溶存酸素あるいは電解で生じる O_2 と反応することによって生じる



の2段階の反応である。式(9-2)、(9-3)の反応は常温ではきわめて緩やかに進行するが、陽極溶出しているCuはきわめて活性な状態にあるので、この反応が生じ得る⁶⁵⁾。

図9-1は NaNO_3 水溶液を入れたビーカーの中にCu板C1020Pとステンレス鋼SUS304の平板を対向させて浸し、Cu板C1020Pを陽極、ステンレス鋼SUS304を陰極として直流電解を行った場合に測定されたギャップ電圧 V_g と電解電流 I の関係である。電解液の濃度 C_o がTi, Alを不動態化するのに適した0.1%, 0.5%の場合、電解電流 I はギャップ電圧 V_g が1[V]以下の低い電圧範囲からギャップ電圧 V_g の増加とともに急激に増大した。これよりこれらの電解液濃度 C_o の場合、Cuの陽極溶出が生じる分解電圧 V_o は0.5[V]前後の低い値であることが分かった。電解液の濃度 C_o を低くすると、電解電流 I の増加割合はギャップ電圧 V_g の増加に対して次第に緩やかになり、これにともなって分解電圧 V_o は徐々に大きくなる。電解液の濃度 C_o が0.03%の場合、分解電圧 V_o は約1[V]である。

このようにCuの分解電圧 V_o がAl, Tiの場合に比べて小さくなる理由は、第4章の表4-2に示したように、CuがOと反応する際の生成自由エネルギー ΔG^0 が小さいために化合物が生成されにくく(相対的に化学的活性が低い)不動態化しにくいことによる。

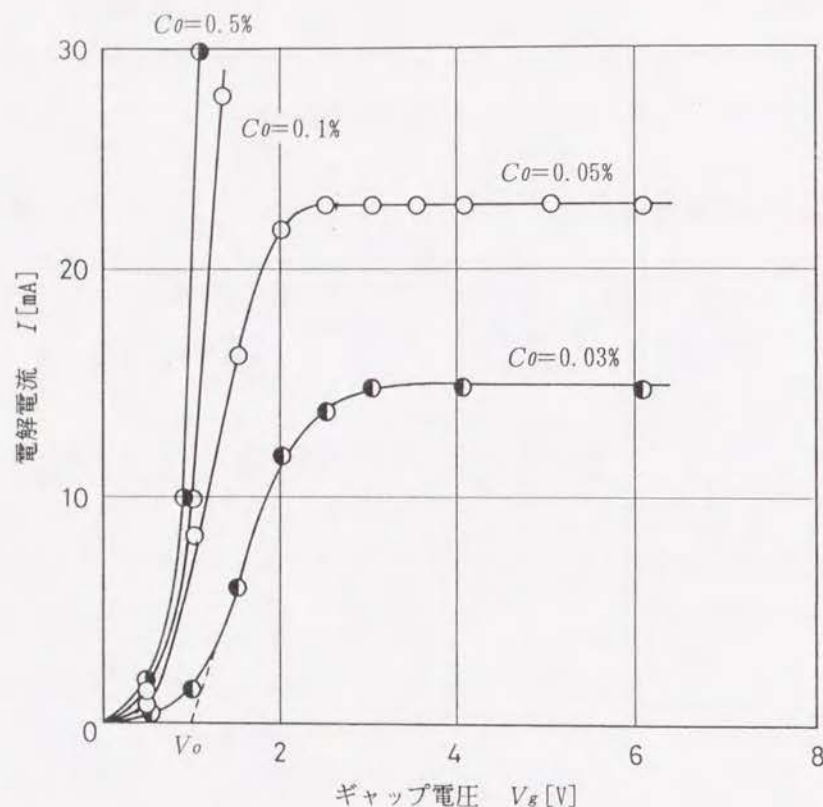


図9-1 Cuを電解加工した場合のギャップ電圧と電解電流の関係
(C1020, $A_e=10[\text{cm}^2]$, $I_g=3[\text{mm}]$)

すなわち不動態化膜が生成されると陽極と電解液の界面で抵抗分極による電圧降下が生じるが、この電圧降下は不動態化膜の抵抗 R_p に比例して大きくなる。過不動態化域にするにはこの電圧降下より高いギャップ電圧 V_g を印加する必要がある。Cuのように化学的活性が低い金属は酸化されにくいので、不動態化膜が生成してもその膜厚 h_p は薄くて不動態化膜の抵抗 R_p が小さいために分解電圧 V_o が小さくなったと思われる。

以上のことから考えて、Cuは酸素酸塩型の電解液を用いて不動態化させることができる。しかし不動態化する分解電圧 V_o は低いので、電解バフ複合加工を行うに際してはギャップ電圧 V_g を低い値で一定に保つ必要がある。

9-3 実験装置と方法

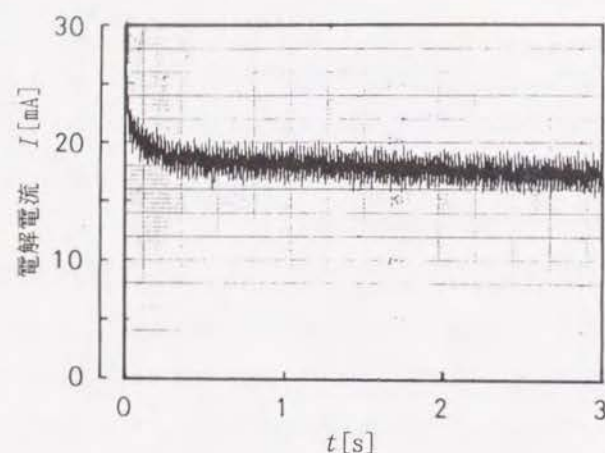
Cuを電解バフ複合加工した場合の表面粗さがどのようなになるのかを調べるために平面形状をした工作物の加工実験を行う。実験装置は回転円盤型の複合工具電極を用いた平面の加工を行う場合と同様に、第3章の図3-1に示したNCフライス盤に搭載したものをを用いる。工作物としては無酸素銅のC1020Pを用いる。

加工実験は、まず電解液として NaNO_3 水溶液を用いた場合に不動態化膜の生成にともなう電解電流 I の減少が生じるかどうかを調べるために、第3章の図3-1に示した方法で過渡電流を測定する。この測定は電解加工の場合と電解バフ複合加工の場合について行う。次にバフ研磨材を用いて電解バフ複合加工を行い、ギャップ電圧 V_g 、砥粒の粒度、複合工具電極の回転数 N_R が工作物の表面粗さに及ぼす影響を調べる。さらに砥粒の粒度が表面粗さに及ぼす影響を調べるために、第5章の図5-3に示した遊離砥粒を用いた電解バフ複合加工を行う。

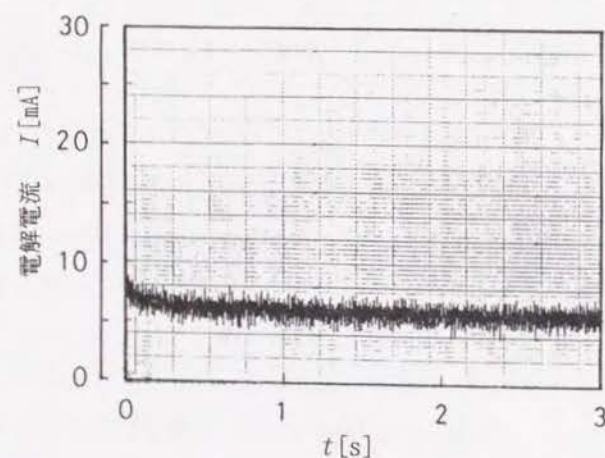
9-4 実験結果と考察

電解加工と電解バフ複合加工それぞれについて、ステップ状のギャップ電圧 V_g を印加した際に測定された電解電流 I の変化を図9-2に示す。電解加工の場合、電解電流 I は同図(a)に示すようにギャップ電圧 V_g を印加した当初に最大になるが、時間 t が経過するにつれて電解電流 I は次第に減少して一定値になる。なお加工後の表面は淡い赤紫色に変色していた。このような電解電流 I の減少と加工後の表面の変化は、Ti, Alが不動態化する際にみられるのと同様なものである。ただしCuを電解した場合、電解電流 I が一定となった値は、最大値に対して約20%程度の減少にとどまり、Tiの場合(約90%の減少)のように不動態化にともなう電解電流 I の極端な減少は生じていない。

Cuを電解加工した場合に電解電流 I の極端な減少が生じない原因を調べるために、電解液の抵抗 R_e と不動態化膜の抵抗 R_p の値を図9-2(a)の測定結果から計算してみる。電解液の抵抗 R_e は、ギャップ電圧 V_g を印加した直後に流れる最大電流 I_p とギャップ電圧 V_g から式(3-4)により求められる。さらに式(3-6)により定常電流 I_s とギャップ電圧 V_g からギャップ抵抗 R_g を求め、ギャップ抵抗 R_g から先に求めた電解液の抵抗 R_e を差し引けば不動態化膜の抵抗 R_p が求められる。計算の結果、Cuの電解加工を行った場合の電解液の抵抗 R_e は $60.8[\Omega]$ に対し、不動態化膜の抵抗 R_p は $16.2[\Omega]$ になった。この計算結果を第3章の3-3-3で述べたTiの電解加工を行った



(a) 電解加工の場合
(C1020, 0.05%aq. NaNO₃, $A_e=28.8[\text{cm}^2]$,
 $I_g=5[\text{mm}]$, $V_g=1.4[\text{V}]$)



(a) 電解バフ複合加工の場合
(C1020, 0.05%aq. NaNO₃, $A_e=28.8[\text{cm}^2]$,
 $I_g=5[\text{mm}]$, $V_g=1.4[\text{V}]$, #600バフ研磨材)

図9-2 Cuを加工する場合にステップ状のギャップ電圧を印加した場合の電解電流の時間変化

場合と比較すると、Tiの場合には電解液の抵抗 $R_e=1.2[\Omega]$ に対して不働態化膜の抵抗 $R_p=2500[\Omega]$ と大きな差があったのに比べて、Cuの場合には電解液の抵抗 R_e と不働態化膜の抵抗 R_p の差は少ないことが分かった。

バフ研磨材の擦過作用を複合させると、図9-2(b)のようにギャップ電圧 V_g を印加した当初に見られる電解電流 I の減少は電解加工の場合に比べて少なく、一定値に至るまでの時間 t も短くなった。なお加工後の表面には砥粒の擦過条痕が形成されていた。

次に、Cuを電解バフ複合加工する場合のギャップ電圧 V_g が表面粗さにおよぼす影響を調べたところ、図9-3に示すギャップ電圧 V_g と表面粗さの関係が得られた。表面粗さはギャップ電圧 V_g がCuの分解電圧 V_o よりやや高めの1.5~3[V]の範囲で最も良くなった。ギャップ電圧 V_g が0~1.5[V]の範囲で表面粗さがわるくなるのは、不働態化膜が生成されにくいために砥粒のくい込み量 h_d が大きくなって、バフ研磨材がCuの切り屑で目詰まりしたためと思われる。またギャップ電圧 V_g が3[V]以上になると、表面粗さは再びわるくなったが、これは陽極溶出が生じたためと思われる。

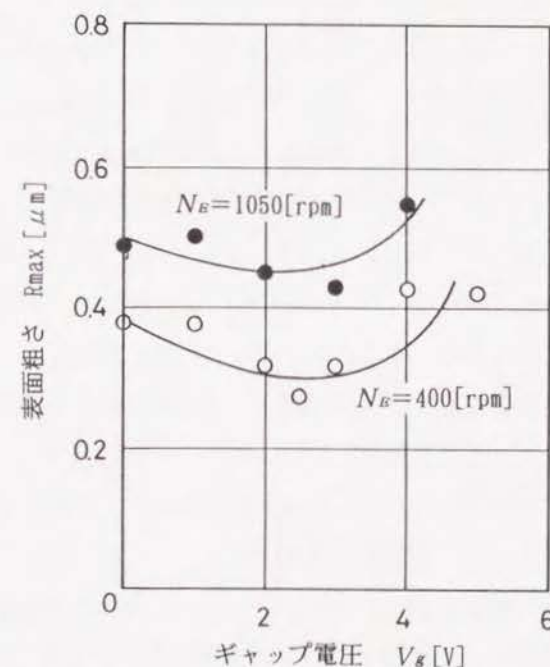


図9-3 Cuの電解バフ複合加工を行った場合のギャップ電圧と表面粗さの関係
(C1020, $A_e=28.8[\text{cm}^2]$, 0.05%aq. NaNO₃, $V_f=320[\text{mm/min}]$, #1000バフ研磨材)

複合工具電極の回転数 N_R を変えて加工を行うと、表面粗さと回転数 N_R の関係は図9-4に示すように、ギャップ電圧 V_g が0[V]および2[V]のいずれの場合も回転数 N_R が増加するにつれて表面粗さはわるくなった。この傾向はステンレス鋼SUS304などの材料を電解パフ複合加工した場合とは逆（回転数 N_R の増加につれて表面粗さは良くなる）なのでその原因について考える。

原因の1つは陽極溶出が生じやすくなったことによる。すなわち、砥粒で擦過されたCuの表面に再び不動態化膜が生成されるまでに要する時間が砥粒の平均擦過間隔 t_m より長い場合には、第2章の2-4-1で述べたようにCuの素地が露出状態になる。この場合、陽極溶出が生じるので表面が荒れる。回転数 N_R が増大すると、砥粒の平均擦過間隔 t_m は第4章の式(4-27)に示したように減少するので、このような現象が生じ得る。

もう1つの原因はパフ研磨材の目詰まりである。図9-4より、ギャップ電圧 V_g が0[V]の場合に回転数 N_R が増加するにつれて表面粗さがわるくなることから、砥粒の切れ刃による正常な切削が行えていないことが分かる。加工後のパフ研磨材の表面に付着したCuの切り屑の量は複合工具電極の回転数 N_R が増大するほど多くなっており、パフ研磨材の目詰まりが回転数 N_R の増大とともに増加している。

このようにCuを不動態化のギャップ電圧 V_g で加工を行うと、表面粗さはギャップ電圧 V_g を加えない場合に比べて良くなる。しかし表面粗さは平均粒径16[μm]の砥粒を用いた場合でも R_{max} 約0.2[μm]とわるく、鏡面にするためにはより粒径の小さい砥粒の擦過作用を複合する必要があることが分かったので、遊離砥粒を用いた電解パフ複合加工を行うこととした。

表面粗さ R_{max} 0.2[μm]の工作物に対して平均粒径2[μm]の Al_2O_3 の砥粒を用いて加工を行うと、Cuの表面は加工が進むにつれて次第に淡い赤紫色に変化し、かつ下地の擦過条痕が除去されて表面が平滑化されていった。図9-5は加工途中の表面粗さのプロフィールを示したもので、このとき表面粗さは R_{max} 約0.1[μm]であった。

加工を継続すると表面粗さはいくぶん良くなるようであるが、表面は色が濃くなるにつれてくもりが生じるようになり、表面粗さは逆にわるくなった。同時に研磨布の目詰まりが生じた。これはCuの不動態化膜がTiの場合のようにある一定の膜厚 h_w で飽和するのではなく、時間 t の経過につれて厚くなる性質を持つためではないかと考えられる。電解パフ複合加工でCuを鏡面加工するためには砥粒の粒径の異なる加工工程を増やし、各工程での加工時間 t を短くして加工を行う必要があることが分かった。

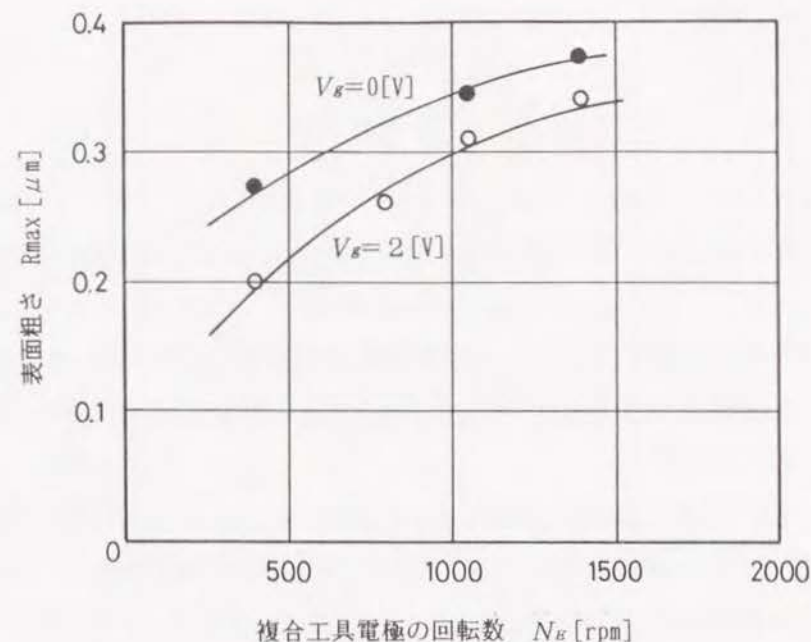


図9-4 複合工具電極の回転数と表面粗さの関係
(C1020, $A_e = 28.8[\text{cm}^2]$, 0.05%aq. NaNO_3 , $V_f = 320[\text{mm/min}]$, #1000パフ研磨材)

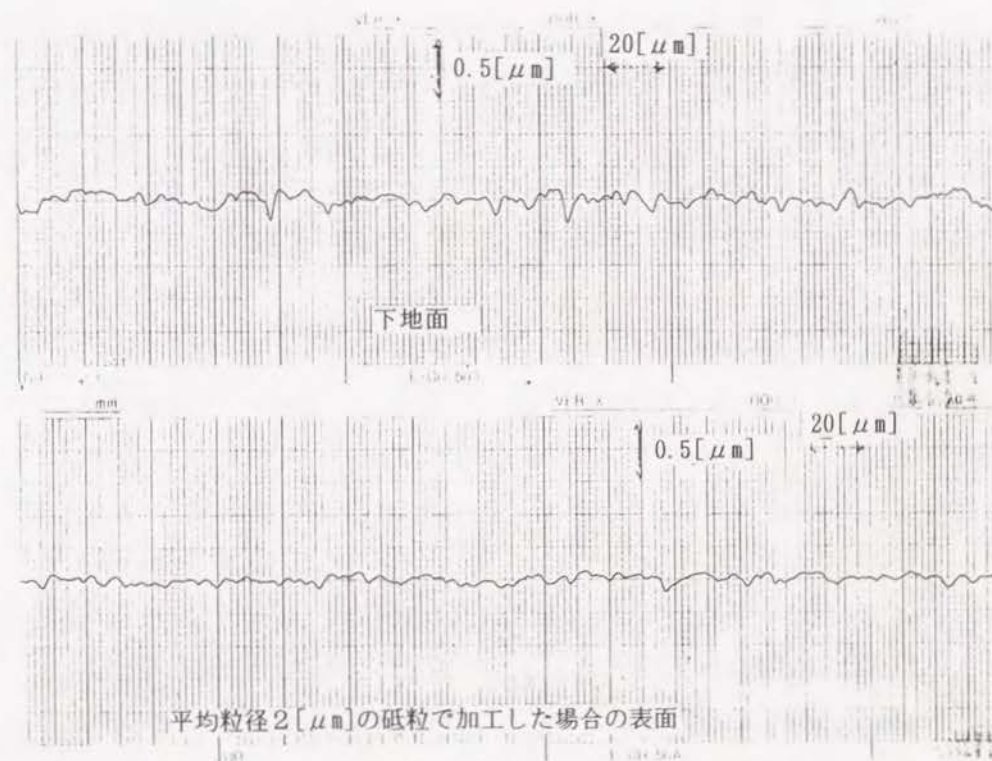


図9-5 遊離砥粒を用いた電解パフ複合加工によるCuの表面のプロフィール

Cuの不働態化膜の特徴について検討し、電解バフ複合加工による鏡面加工実験を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 酸素酸塩型の電解液を用いてCuを直流電解した場合、Cuが不働態化するギャップ電圧 V_g は1[V]前後である。この電圧はステンレス鋼、Ti、Alを電解した場合に比べてかなり低い。
- (2) Cuが不働態化する過程では電解電流 I の減少が生じるが、電流の最大値 I_p と最小値 I_s の差は少ない。これはCuの不働態化膜の抵抗率 ρ_w が低いか、不働態化膜の膜厚 h_w が薄いためと思われる。
- (3) 電解バフ複合加工でCuを加工すると不働態化のギャップ電圧 V_g 付近で表面粗さが最も良くなる。さらにCuは遊離砥粒を用いた電解複合加工によって表面粗さ $R_{max} 0.1[\mu m]$ 前後に加工できる。ただし加工時間 t を長くしすぎると表面にくもりが生じて表面粗さはわるくなる。これはCuの不働態化膜がTiの場合のようにある一定の膜厚 h_w で飽和するのではなく、時間 t の経過につれて厚くなる性質を持つためである。

本研究は、電解バフ複合加工法の加工機構を定量的に解析し、これに基づいて鏡面加工を能率よく行うために必要な砥粒に与えるべき軌跡について考察し、さらに鏡面加工の必要性の高いステンレス鋼、炭素鋼、Ti、Al、Cuについて不働態化膜の特徴を考察して、これらの材料を鏡面加工する方法について具体的に研究したものである。本研究の結果次のことが明らかになった。

- (1) 電解加工とバフ研磨材加工を複合した場合、砥粒の擦過間隔 t_m と不働態化膜の生成に要する時間の大小関係により、工作物の除去機構が異なる。電解作用による不働態化膜の生成と砥粒の擦過作用による不働態化膜の除去が繰り返し生じるためには、砥粒の擦過間隔 t_m は不働態化膜の生成に要する時間より長くなければならない。
- (2) 酸素酸塩型の電解液を用いてTiを電解した場合に、電解電流 I がギャップ電圧 V_g を印加した直後に最大になり、その後過渡的に減少して一定値になるのは、不働態化膜が工作物表面上の核になる部分を中心にして、2次元的に拡がりながら生成するためである。表面が不働態化膜で完全に覆われると電解電流 I は一定になる。またTiが不働態化すると、表面に色がつくのは、不働態化膜によって光の干渉が生じるためである。
- (3) Tiの不働態化膜はかなりの大きさの電気抵抗をもつが、静電容量 C_p はきわめて小さい。電解電流 I が過渡的に減少するのは、不働態化膜の生成にともなってギャップ抵抗 R_g が増大するためである。この不働態化膜は投入電気量 q に比例して成長し、工作物の表面が不働態化膜で覆われるのに要する投入電気量 q は工作物の面積 A_e に比例する。
- (4) 回転円盤型複合工具電極と工作物の相対運動によって工作物に形成される砥粒の擦過軌跡は、Y軸方向の軌跡の間隔 ΔY が複合工具電極中心からの距離 y によって変わり、中心から離れるほど間隔が小さくなる。なおX軸方向の軌跡の間隔 ΔX はどこでも一定である。これら軌跡の間隔 ΔX と ΔY は工作物の表面粗さを決定する。

- (5) 工作物上の微小な擦過領域を回転円盤型複合工具電極が通過する場合、この擦過領域は複合工具電極の中心に対する半径 r が異なる多数の砥粒で擦過される。半径 r の複合工具電極の回転角 θ に対する減小の割合は、複合工具電極中心からの距離 y によって変わる。そのため作用砥粒数 M_{sy} が変化し、最も作用砥粒数 M_{sy} が大きくなるのは距離 y が複合工具電極の半径 R_E に対して約57%の位置である。
- (6) 電解作用を受けている工作物が砥粒で擦過されると、不動態化膜が除去されて素地が露出し、電解電流 I が増大して陽極溶出が促進される。しかし砥粒が擦過した後では再び不動態化膜がすみやかに生成されるために電解電流 I は急速に減少する。電解パフ複合加工で加工される工作物の微小な擦過領域では、不動態化膜の除去と生成が繰り返されて電解電流 I はパルス状になる。したがって1個の砥粒が擦過するたびに1個のパルスが生じる。
- (7) 電解パフ複合加工の電解電流 I は、工作物の微小な擦過領域を流れるパルス状の電解電流の累積で構成され、電流値は砥粒の大きさによって変わる。また工作物の材料除去率 w は、工作物が不動態化するギャップ電圧 V_g を印加しているにもかかわらず、パフ研磨材の擦過作用を複合することによって電解電流 I に比例して増加する。これは砥粒の擦過作用で不動態化膜が除去されて工作物の素地が露出し、そこに電解電流 I が流れて陽極溶出が生じるためである。
- (8) 電解パフ複合加工でステンレス鋼SUS304の加工を行う場合、この材料が不動態化するギャップ電圧 V_g を印加して、砥粒の粒度 #1500 より高い粒度のパフ研磨材を用いると、表面粗さ $R_{max} 0.05[\mu m]$ の鏡面を得ることができた。ただしステンレス鋼SUS304は、結晶の粒界部分が陽極溶出しやすいため、加工能率を高めようとして電解電流 I を大きくし過ぎると結晶の粒界部分の陽極溶出が先行して溝が生じ、表面が荒れるので注意を要する。さらにステンレス鋼SUS304は遊離砥粒を用いた電解パフ複合加工でも加工することができ、この場合にもパフ研磨材加工のみの場合に比べてより大きな材料除去率 w で、より小さな表面粗さが得られた。
- (9) 工作物の形状精度に関して、回転円盤型複合工具電極で加工された工作物の除去深さ hz は、複合工具電極中心からの距離 y によって変わる中凸パターンになる。これはパフ研磨材の作用砥粒数 M_{sy} が距離 y によって変わることが原因で、距離 y と除去深さ hz の関係は加工パラメータの値が変わっても常に中凸パターンになる。
- (10) 測定された除去深さ hz と複合工具電極中心からの距離 y の関係は、距離 y を複

合工具電極の半径 R_E に対して、除去深さ hz を中心での除去深さ d_c に対して無次元化すると1つの曲線で表すことができる。この無次元化された曲線から、平面度が設定された工作物を加工する際の複合工具電極の半径 R_E と除去深さ hz の適正値が決定できる。

- (11) 電解パフ複合加工で鏡面加工したステンレス鋼SUS304はa-Si太陽電池の基板として実用できた。また超高真空用のチャンバに用いると、表面からの脱ガスがきわめて少ないので、到達真空度を飛躍的に高められた。
- (12) 炭素鋼S45Cを酸素酸塩型の電解液を用いて電解した場合、ギャップ電圧 $V_g=2.4[V]$ 以下の範囲で不動態化が生じる。不動態化膜が生成された表面は黒みを帯びて錆びにくい。なお炭素鋼S45Cに含まれるCは陽極溶出しないので、電解作用のみで除去すると表面にCの粉末が付着して残る。
- (13) 半径 $R_E=35[mm]$ の回転円盤型複合工具電極にオフセットを与えて円筒状の工作物を加工すると、擦過条痕の交差角 $\Delta\theta_{wc}$ が大きくなって切削加工で形成された送りマークの凹凸が斜交擦過されやすくなる。オフセットを与えない場合 ($H_c=0$) には、凹凸の振幅が大きく周期の長いうねりは複合工具電極のパス数 N_p を増加させても除去することはできなかった。しかしオフセット量 H_c を $20[mm]$ にすると4 passの加工ではほぼ平滑化され、20 passの加工を行うと下地の深い凹部を除いてうねりはかなり平滑化された。
- (14) 下地の凹凸に対して大きな交差角 $\Delta\theta_{wc}$ の擦過条痕を形成するほど、うねりの平滑化作用は高まる。ただし交差角 $\Delta\theta_{wc}$ を $140[deg]$ 以上にした場合、うねりは交差角 $\Delta\theta_{wc}$ を大きくしてもあまり変化せず、 $\Delta\theta_{wc}=120[deg]$ 前後の交差角を与えた場合が最もうねりが小さくなった。さらに回転している円筒状の工作物をオフセットを与えて加工すると工作物の真円度が向上する。これは真円でない工作物を加工した場合に生じる電解ギャップ I_g の変化により、電解電流 I 、パフ研磨材の単位面積あたりの荷重 PP が電解ギャップ I_g の短い部分で増大し、突出部分が除去されやすくなるためである。
- (15) 水を浸したパフ研磨材で純Ti 2種を擦過すると、砥粒の損耗、脱落が生じて、かつ不織布の繊維組織が目詰まりする。加工された純Ti 2種の表面は、擦過条痕が途切れ途切れに形成されて連続性がなく、かつ随所にむしろ非水溶性でかつ粘着性のTiの水酸化物が付着する。これらは擦過する際の温度上昇と、温度上昇によってTi

の化学的活性が高められて砥粒との接触域で化学反応が生じるために起こる。このような現象を抑制するためには、砥粒とTiの接触域に浸透しやすい加工液を用い、かつTiの表面に化学的に安定な保護膜を生成してTiの水酸化物が生成するのを抑制することが効果的である。

(16) 電解液に界面活性剤を添加した加工液を用いて純Ti 2種をバフ研磨材加工すると、電解液が砥粒とTiの素地との接触域に浸透しやすくなるため、表面粗さは若干減少するが、表面にはむしれが生じて加工後のバフ研磨材の損耗も著しい。ギャップ電圧 V_g を加えた場合には、界面活性剤を添加しなくとも表面粗さは若干よくなった。さらに界面活性剤を1%程度添加すると、表面粗さは急激によくなり、表面のむしれとバフ研磨材の目詰まりがなくなった。界面活性剤を添加した電解液を用い、不働態化の電解条件で純Ti 2種を電解バフ複合加工すると、砥粒の粒度 #1500 のバフ研磨材を用いた場合に表面粗さ R_{max} 0.05 [μm] の鏡面が得られた。

(17) 工業用純Al A1050の不働態化膜はステンレス鋼SUS304、炭素鋼S45C、純Ti 2種の不働態化膜に比べてかなり膜厚 h_w が厚い。この材料を鏡面加工するにはポーラス状の不働態化膜が生成するのを抑制する必要がある。電解バフ複合加工で工業用純Al A1050の加工を行うと、表面粗さは不働態化のギャップ電圧 V_g で加工を行った場合に最も良くなった。この電圧条件の場合、ポーラスな不働態化膜はあまり生成されず光沢面が得られた。表面粗さは砥粒の粒径と擦過軌跡によって決まる。

(18) 酸素酸塩型の電解液を用いて無酸素銅C1020を直流電解した場合、この材料が不働態化するギャップ電圧 V_g は1[V]前後である。この電圧はステンレス鋼SUS304、純Ti 2種、工業用純Al A1050を電解した場合に比べてかなり低い。Cuが不働態化する過程では電解電流 I の減少が生じるが、電流の最大値 I_p と定常値 I_s の差は少ない。これはCuの不働態化膜の抵抗率 ρ_w が低いか、不働態化膜の厚み h_w が薄いためと思われる。

(19) 電解バフ複合加工で無酸素銅C1020を加工すると不働態化のギャップ電圧 V_g 付近で表面粗さが最小になる。さらに無酸素銅C1020は遊離砥粒を用いた電解バフ複合加工によって表面粗さ R_{max} 0.1 [μm] 以下に加工できる。ただし加工時間 t を長くしすぎると表面にくもりが生じて表面粗さはわるくなる。これはCuの不働態化膜がTiの場合のようにある一定の膜厚 h_w で飽和するのではなく、加工時間 t の経過につれて厚くなる性質を持つためである。

謝 辞

本研究の遂行と論文の作成にあたり御厚情に満ちた御教示と御鞭撻を賜りました大阪工業大学 木本保夫教授に深甚の謝意を表します。

本論文をまとめるにあたり懇切なる御指導と御教示を賜りました京都大学 工学部 垣野義昭教授に心より感謝の意を表します。

論文内容について貴重な御意見を賜りました大阪工業大学 喜田義宏教授に深甚の謝意を表します。

多くの研究の機会を与えていただいた日立造船(株)技術研究所 加工・制御研究室長 山本昌彦博士(現在 近畿大学理工学部教授)と田宮勝恒主事(現在 日立造船(株)事業開発本部精密機器開発部 副参事)ならびに(株)曙川電機製作所代表取締役 東口良樹氏に深甚の謝意を表します。

数多くの実験と計測を行うにあたり、実験設備をご提供いただいた大阪工業大学 経営工学教室の皆様、特に共に研究を進めるにあたりご助力いただいた大学院生の諸岡寿史氏(現在 大日本印刷(株)勤務)、中川雅之氏(現在 (株)ダイフク勤務)、鈴木高志氏(現在 村田機械(株)勤務)に末筆ながら深謝いたします。

参考文献

第1章

- 1) 木下直治：複合加工法概論、昭和42年度精機学会春期大会学術講演会、複合加工法に関するシンポジウム前刷、(1967)p1.
- 2) 大越 諄：最近の切削加工法、精密機械、32, 1(1966)p1.
- 3) 山崎正雄：電解複合加工について、精密機械、34, 6(1968)p363.
- 4) 木本康雄、田宮勝恒、本田昭一：ステンレス鋼の電解複合鏡面研磨、電気加工学会誌、12, 23(1978)p1.
- 5) 木本康雄、垣野義昭、中川眞二：高精度電解複合鏡面加工の研究、精密工学会誌、54, 2(1988. 2)p109.
- 6) 木本康雄、垣野義昭：超精密電解複合加工の研究（第1報）、電気加工学会誌、20, 39(1986)p1.
- 7) 清宮紘一、浅川：ステンレス鋼の電解砥粒研磨特性、1990年度精密工学会秋期大会学術講演会講演論文集、(1990)123

第2章

- 8) 木本康雄：電気・電子応用精密加工、オーム社、(1982)p189.
- 9) 沖 猛雄：金属電気化学、共立出版、(1983)p46.
- 10) 佐藤教男：不働態の歴史、金属表面技術、37, 8(1986)p388.
- 11) 吉沢四郎、渡辺信淳：電気化学1、共立全書158、(1977. 2)p158.
- 12) 沖 猛雄：金属電気化学、共立出版、(1983)p101.
- 13) 木本康雄、垣野義昭、小島一志：電解複合鏡面加工の基礎的研究、大阪工業大学紀要、29, 2(1985)p15.
- 14) 谷口紀男：ナノテクノロジーの基礎と応用、工業調査会、(1988. 11)p246.
- 15) 荒井伸治、葉石雄一郎、高鷲民生：電解加工の研究、電気加工学会誌、7, 14(1974. 3)p1.
- 16) 杉江他曾江、藤井 知、吉沢四郎、山川宏二：電解加工における種々な鉄鋼材料の電流密度と加工性能、電気化学、46, 3(1978)p154.
- 17) 精機学会編：新訂精密工作便覧、コロナ社、(1981)p808.
- 18) 砥粒加工研究会熊谷記念会編：超精密加工技術、工業調査会、(1984. 8)p446.
- 19) 精機学会編：新訂精密工作便覧、コロナ社、(1981)p1881.
- 20) 機械工作学編集委員会編：機械工作学、産業図書、(1987. 9)p149.

第3章

- 21) 魚崎浩平、喜多英明：電気化学の基礎、技報堂出版、(1985. 4)p196.

- 22) 日本学術振興会薄膜第131委員会編：薄膜ハンドブック、オーム社、(1988. 5)p410.
- 23) 渡辺信淳、渡辺 昌、玉井康勝：表面および界面、共立出版、(1981. 10)p41.
- 24) 久保田 廣：応用光学、岩波全書、(1973. 6)p195.
- 25) 石黒：光学、共立全書、(1969. 2)p168.
- 26) 藤嶋昭、相澤益男、井上 徹：電気化学測定法（上）、技報堂出版、(1985. 8)p209.
- 27) 逢坂哲彌、小山 昇、大坂武男：電気化学法—基礎測定マニュアル、講談社サイエンティフィック、(1989. 4)p157.
- 28) 加藤一郎：過渡現象論演習、学献社、(1989. 2)p34.
- 29) J. C. Scully: The Growth of Surface Films in Electrolytes, NATO Conf. Ser. 6, 5(1983)p637.
- 30) 菅沼栄一：超硬合金の電解加工における電解生成物の生成過程と陰極電解による除去作用、電気加工学会誌、13, 26(1979)p3.
- 31) R. D. Armstrong, G. M. Bulman, H. R. Thirsk: The Passivation of Zinc Amalgam in Alkaline Solutions, J. Electroanal. Chem., 22(1969)p55.

第4章

- 32) H. S. Carslaw, J. C. Jaeger: Conduction of Heat in Solids SECOND EDITION, OXFORD AT THE CLARENDON PRESS, (1959)p264.
- 33) R. V. Churchill, Operational Mathematics, 洪四方次（訳）：応用ラプラス変換、彰国社、(1963)p165.
- 34) E. Cartmell著、寺田 晃訳：エンジニアのための化学、東京化学同人、(1970. 3)p47.
- 35) 腐食防食協会編：金属材料の高温酸化と高温腐食、丸善、(1982. 7)p21.
- 36) 北田正弘：初級金属学、アグネ、(1978. 1)p211.
- 37) 木本康雄、田宮勝恒：力の測定における圧電素子の校正、精密機械、29, 3(1963)p220.
- 38) 戸田盛和、宮島龍興編：物理学ハンドブック、朝倉書店、(1973. 4)p28.
- 39) 中川眞二、木本康雄、垣野義昭：超精密電解複合加工に関する研究（第2報）、電気加工学会誌、20, 40(1987)p14.

第5章

- 40) 田宮勝恒：a-Si太陽電池用ステンレス基板、最新アモルファスSiハンドブック、サイエンスフォーラム、(1973)p283.
- 41) 大見忠弘：半導体ガス供給系クリーン化の問題点、超LSIウルトラクリーンテクノロジーシンポジウム前刷集、半導体基盤技術研究会(1985)p1.
- 42) 金属表面技術協会編：金属表面技術便覧、日刊工業、(1987)p768.
- 43) 長谷川正義編：ステンレス鋼便覧、日刊工業新聞、(1976. 11)p841.
- 44) 滝沢貴久男：ステンレス鋼のパッシベーション、表面技術、41, 3(1990)p195.
- 45) 岡本博明、浜川圭弘：アモルファス・シリコンヘテロフェイス太陽電池、応用物理、

49, 9(1978)

- 46) 浜川圭弘編：最新太陽光発電技術、槇書店、(1984. 7)p77.
- 47) 三宅清司：薄膜の基礎技術、朝倉書店、(1968. 6)p199.
- 48) 逢坂哲彌、二瓶公志編：機能性膜プロセス技術、広信社、(1987. 6)p640.

第6章

- 49) 精密工学会編：新版精密工作便覧、(1992. 2)p77.
- 50) 日本鉄鋼協会編：第3版鉄鋼便覧、丸善、(1982. 5)p387.

第7章

- 51) 機械技術データシート：チタン合金 6Al-4V に対する各種切削工具の工具摩耗、機械技術、日刊工業新聞、31, 4(1983. 4)p215.
- 52) 熊谷信男：チタンのメカノケミカルポリッシング、昭和54年度精機学会秋期大会学術講演論文集241, (1979. 10)4A.
- 53) 熊谷信男：チタン合金の超精密研磨に関する研究（第2報）、1991年度精密工学会秋期大会学術講演会講演論文集, (1991)G23.
- 54) F. P. Bowden, D. Tabor 著、曾田範宗訳：潤滑と摩耗、丸善、(1982. 1)p31.
- 55) 桜井俊男：潤滑の物理化学、幸書店、(1983)p125.
- 56) 桜井俊男、玉井康勝編：応用界面化学、朝倉書店、(1967. 3)p142.

第8章

- 57) 田島 栄：電気化学通論、共立出版、(1978. 3)p232.
- 58) 永山政一、高橋英明、甲田満：アルミニウムアノード酸化皮膜の生成・溶解の挙動、金属表面技術、30. 9(1979)p438.
- 59) 小久保定次郎：アルミニウムの表面処理、内田老鶴圃、(1987. 5)p62.
- 60) 佐藤敏彦：アルマイトの電気化学、軽金属出版、(1982. 7)p225.
- 61) 軽金属協会編：アルミニウムハンドブック、(社)軽金属協会、(1982. 9)p49.

第9章

- 62) 馬場秋次郎編：機械工学必携、三省堂、(1982. 2)p268.
- 63) 日本規格協会編：J I S ハンドブック非鉄、日本規格協会、(1990. 4)p243.
- 64) 狩野勝吉：難削材の切削加工技術、工業調査会、(1989. 3)p268.
- 65) 沖 猛雄：金属電気化学、共立出版、(1983)p107.